

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**APLICACIÓN DEL DISEÑO FACTORIAL EN LA
OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO DE UNA PICO
TURBINA DE EJE VERTICAL EN EL VALLE DEL
MANTARO**

TESIS

**Presentado por el Bachiller:
RIGOBERTO HUAMÁN HUALLPA
Para optar el Título Profesional de:**

INGENIERO MECÁNICO

HUANCAYO – PERÚ

2009

ASESOR

Mg. Máximo Valeriano Huamán Adriano

A mi madre, por su esfuerzo, dedicación y cariño.

A mi esposa por su apoyo constante.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi sincera gratitud a los catedráticos de la Facultad de Ingeniería Mecánica, por la formación que me impartieron y por la amistad que me brindaron.

CONTENIDO

RESUMEN	
INTRODUCCIÓN	
CAPÍTULO I	10
ASPECTOS GENERALES DE LA INVESTIGACIÓN	10
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
1.2 ANTECEDENTES.....	11
1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	16
1.4 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	17
1.5 OBJETIVOS	17
1.6 HIPÓTESIS	18
1.7 METODOLOGÍA	19
1.8 POBLACIÓN Y MUESTRA	19
CAPÍTULO II.....	20
ENERGÍA A PEQUEÑA ESCALA	20
2.1 ENERGÍA A PEQUEÑA ESCALA	20
2.2 SOLUCIONES HIDROELÉCTRICAS SOSTENIBLES	22
2.3 ACOMPAÑAMIENTO CON FUENTES DE ENERGÍA ALTERNATIVA ..	22
2.4 ENERGÍA HIDROELÉCTRICA A PEQUEÑA ESCALA EN CHINA	23
2.5 ENERGÍA HIDROELÉCTRICA A PEQUEÑA ESCALA EN NEPAL	27
CAPÍTULO III.....	30
ANÁLISIS FACTORIAL	30
3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES	30
3.2 DISEÑOS FACTORIALES A DOS NIVELES	32
3.3 EXPERIMENTOS FACTORIALES	33
3.4 DISEÑOS FACTORIALES 2^k	35
3.5 DISEÑO FACTORIAL 2^2	36
CAPÍTULO IV.....	38
CENTRALES HIDROELÉCTRICAS	38
4.1 LA ENERGÍA DEL AGUA	38
4.2 LAS DIFERENTES CENTRALES HIDROELÉCTRICAS	39
4.3 VENTAJAS E INCONVENIENTES DE UNA CENTRAL DE AGUA FLUYENTE.....	42
4.4 EQUIPO ELECTROMECAÁNICO	44
CAPÍTULO V.....	66
DESARROLLO DEL TRABAJO EXPERIMENTAL	66
5.1 DIRECTRICES PARA EL DISEÑO DE EXPERIMENTOS	66
5.2 PRIMER MÓDULO DE EXPERIMENTOS.....	69
5.3 SEGUNDO MÓDULO DE EXPERIMENTOS.....	77
CAPÍTULO VI.....	86
ANÁLISIS DE DATOS	86

6.1	PRIMER MÓDULO	86
6.2	SEGUNDO MÓDULO	94
	CONCLUSIONES	
	RECOMENDACIONES	
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

RESUMEN

Esta tesis propone la utilización del diseño factorial para la optimización de un picoturbina de eje vertical que pueda ser utilizado en canales de irrigación del Valle del Mantaro.

Quizás el problema más crítico que afronta la humanidad en la actualidad es la escasez cada vez más creciente del agua, por lo que existe la urgencia que los trabajos de investigación tengan que estar centrados en la mejor utilización de los recursos hídricos.

Problema muy difícil de afrontar en nuestra región, pues existe una cultura de desperdicio del agua.

El 85% de los recursos de agua dulce, son perdidos en la agricultura al aplicar riego por inundación, un método deficiente, que ocasiona una gran escasez del agua y disputas continuas por este valioso recurso por parte de los agricultores.

La generación de energía micro hidráulica en nuestra región es prácticamente nula, pese a tener el privilegio de tener todavía grandes recursos hídricos.

Son algunas de las razones para que la Ingeniería Mecánica tenga la urgencia de redoblar esfuerzos en la investigación, que sirva para generar nuevas formas de energía, tales como los de carácter renovable.

Una de estas alternativas es la micro hidráulica, la pico turbina de eje vertical materia de esta tesis, aprovecha la energía de los canales de irrigación, y puede generar energía tanto para el bombeo de agua, que pueda ser aprovechada para riego tecnificado, como también para la generación de energía eléctrica.

El uso masificado de la pico turbina puede solucionar en parte el problema de la escasez del agua en todo el Valle del Mantaro.

El diseño factorial tiene como objetivo principal determinar una combinación de niveles de los factores o variables para optimizar los sistemas. Para optimizar el funcionamiento de la pico turbina de eje vertical tomaremos el modelo 2^2 , y estableceremos cuatro tratamientos, cada una con cinco replicas y dos módulos de experimentación.

La optimización de los recursos hídricos es entonces de urgencia, por lo que la utilización de sistemas como la pico turbina de eje vertical representa un reto muy grande siguiendo ejemplos tan aleccionadores como el de China, donde casi 300 millones de personas viven con energías renovables.

INTRODUCCIÓN

Uno de los objetivos más importante en la Ingeniería Mecánica es la optimización de los sistemas, para los cual se utilizan diversos métodos, uno de ellos es el diseño factorial.

Con la aplicación del diseño factorial se puede explorar como los factores más importantes pueden interactuar para optimizar la variable respuesta.

Es de suma importancia que se pueda conocer métodos comprobados científicamente, procedimientos para mejorar el rendimiento de las máquinas y se tenga con certeza la posibilidad de conocer cuando la variable respuesta logra su más alto rendimiento.

La presente tesis en su capítulo I, contiene los aspectos generales de la Investigación, donde se menciona lo más resaltante de la Tesis; El capítulo II describe los aspectos más importantes de la energía a pequeña escala; el capítulo III, describe de manera detallada las características y

aplicaciones del diseño factorial; el capítulo IV muestra lo más resaltante de las centrales hidroeléctricas; en el capítulo V se ejecuta todo el trabajo experimental; el capítulo VI se analizan los resultados.

El autor.

CONCLUSIONES

1. Con los resultados obtenidos luego del análisis factorial en los dos módulos experimentales realizados se ha podido concluir que la pico turbina disminuye su rendimiento de manera considerable cuando los alabes se inclinan a 105° con respecto a la abscisa y los resultados corroborados con el análisis factorial y el análisis de residuos muestra serias distorsiones.
2. Ocurre lo contrario, cuando se analiza el sistema con el segundo modulo de experimentación, se nota claramente que existe un comportamiento de la variable respuesta con mayor consistencia corroborado por el análisis de la varianza y el análisis de residuos por lo que se concluye que el sistema trabaja es su más alto nivel cuando la variable de número de alabes es baja y la inclinación está a 90° con respecto a la abscisa, aunque muy cercano a este

resultado se encuentra el tratamiento donde la variable número de alabes es alta y la variable ángulo de alabes es 90° .

3. Para la experimentación en los dos módulos realizados, se elaboraron dos matrices aplicando el diseño factorial con dos variables independientes con dos niveles, luego se realizaron cuatro tratamientos con cinco replicas, este trabajo experimental se realizo en el distrito de Orcotuna.
4. Con el diseño factorial y apoyado con el análisis de la varianza para corroborar resultados, del mismo modo el análisis de residuos para evaluar la validez del diseño experimental se pudo analizar los efectos de los factores cuantificando la magnitud del error y la interacción de ellos con respecto a la variables respuesta
5. Aplicando el teorema de Cochran se pudo validar la hipótesis, concluyendo que el diseño factorial es un método eficaz para optimizar la pico turbina de eje vertical para su aplicación en canales de irrigación del Valle del Mantaro.
6. Para la ejecución de esta tesis hubo la necesidad de construir una pico turbina de alabes semicirculares tomando como base diversos estudios en otros lugares principalmente tales como los planteados en el IX Congreso Latinoamericano de Pequeños aprovechamientos Hidroenergéticos realizado en Argentina.
7. Por lo que podemos concluir que se pudo optimizar el funcionamiento de la Pico turbina de eje vertical cumpliendo con nuestro objetivo general.

RECOMENDACIONES

1. Es necesario hacer un estudio más amplio de todos los canales de irrigación en el Valle del Mantaro para poder replicar este trabajo de investigación.
2. Para disminuir dificultades en las tareas de experimentación es necesario un apoyo de la Universidad pues existe una resistencia por parte de los pobladores que ven con recelo el trabajo de investigación.
3. Es necesario que la Universidad y los profesionales difundan los conocimientos necesarios para el uso eficiente de nuestros recursos hídricos.
4. El conocimiento de energías renovables debe ser difundido con más amplitud a todos los pobladores.

5. Es de suma urgencia que se establezcan políticas más eficientes que propicien el aprovechamiento óptimo de nuestros recursos hídricos.
6. Del mismo modo el riego tecnificado.

BIBLIOGRAFIA

-) Hernandez R, Fernandez C, Baptista P. Metodología de la Investigación. 4 a. ed. México: Mc Graw Hill; 2006.
-) Montgomery D. Diseño y análisis de experimentos. México: Iberoamericana; 2005.
-) Fernández Pedro. Energía Eólica [en línea]. España: [fecha de acceso 10 de setiembre de 2005].URL disponible en: <http://www.termica.webhop.info/>
-) Fernández Pedro. Turbinas hidráulicas [en línea]. España: [fecha de acceso 05 de enero de 2007].URL disponible en: <http://www.termica.webhop.info/>
-) Gilli Jorge . Micro turbinas Hidráulicas [en línea]. España: [fecha de acceso 12 de setiembre de 2006].URL disponible en: <http://www.ulz.info/>
-) Marchegiani Ariel. Turbinas Pelton. [en línea]. España: [fecha de acceso 11 de febrero de 2006].URL disponible en: <http://www.termica.webhop.info/>
-) IX Congreso Latinoamericano y del Caribe sobre pequeños aprovechamientos hidroenergéticos; 2001.
-) Martinez de Vedia R. Energía. Argentina: Alsina; 1990.

-) Rosato M. Diseño de máquinas eólicas de pequeña potencia.
España: Progensa; 2000.
-) Atder B. Minicentrales hidroeléctricas. [Diapositiva]. Nicaragua:
Enerrev; 2008. 35 diapositivas.

ANEXOS

PANEL FOTOGRÁFICO



FOTOGRAFÍA N°01. Pico turbina de eje vertical, puesta en plena prueba experimental, en el canal de irrigación de Orcotuna.
Con 6 álabes y ángulo de 105° .



FOTOGRAFIA N°02. Direccionado el flujo del agua hacia la turbina, para obtener mayor RPM.



FOTOGRAFÍA N°03. Módulo experimental, acondicionado para el tratamiento con 12 álabes y 75°.



FOTOGRAFÍA N°04. Módulo experimental, acondicionado para el tratamiento con 12 álabes y 90°.



FOTOGRAFÍA N° 05. El Investigador y el Prototipo experimental en prueba.



FOTOGRAFÍA N° 06. Prototipo experimental en prueba.

CAPITULO I

ASPECTOS GENERALES DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Y, ¿qué es un hombre sin energía?

Nada, absolutamente nada.

Mark Twain

Onudi (2002), menciona que los objetivos energéticos de la cumbre mundial sobre el desarrollo sostenible a los siguientes:

Realizar acciones conjuntas y mejorar los esfuerzos para trabajar juntos a todos los niveles a fin de mejorar el acceso a unos

servicios seguros y asequibles de energía para el desarrollo sostenible, suficientes para facilitar el logro de los Objetivos de Desarrollo del Milenio, incluyendo el objetivo de reducir a la mitad el porcentaje de personas que viven en la pobreza para el año 2015, y como medio para generar otros servicios importantes que atenúen la pobreza, teniendo en cuenta que el acceso a la energía facilita la erradicación de la pobreza.

Mejorar el acceso a unos recursos y servicios energéticos fiables, asequibles, económicamente viables, social y ambientalmente aceptables, teniendo en cuenta las circunstancias y especificidades nacionales, a través de diversos medios tales como la extensión de la electrificación rural, la descentralización de los sistemas energéticos, un mayor uso de las energías renovables y de combustibles líquidos y gaseosos más limpios y una mayor eficiencia energética...

Ayudar y facilitar de forma acelerada... el acceso de las personas pobres a unos servicios energéticos fiables, asequibles, económicamente viables, social y ambientalmente aceptables, teniendo en cuenta el papel instrumental del desarrollo de políticas energéticas nacionales para el desarrollo sostenible y que se requieren fuertes aumentos de los servicios energéticos en los países en vías de desarrollo para aumentar los niveles de vida de sus poblaciones, sin olvidar que los servicios energéticos

influyen positivamente en la erradicación de la pobreza y mejoran los niveles de vida.

Diversificar el suministro de energía mediante el desarrollo de tecnologías energéticas avanzadas, más limpias, más eficientes, asequibles y rentables, incluidas las hídricas, y su transferencia a los países en vías de desarrollo sobre la base de concesiones acordadas de forma mutua. Aumentar de modo sustancial y urgente la proporción global de fuentes renovables de energía con el objetivo de aumentar su contribución al suministro total de energía asegurando que las políticas energéticas apoyen los esfuerzos de los países en vías de desarrollo por erradicar la pobreza, y evaluar regularmente los datos disponibles para así analizar el progreso hacia este objetivo.

Ayudar a los países en vías de desarrollo a suministrar una energía asequible a las comunidades rurales, especialmente para reducir la dependencia de las fuentes tradicionales de combustible para cocinar y calentar, que afectan a la salud de las mujeres y la infancia.

En nuestro país siempre hemos tenido la sensación de que el agua era un recurso muy abundante por lo que las políticas de desarrollo nacional de manera histórica han priorizado la ejecución de grandes obras en la costa, sin tener en cuenta las zonas ni a los pobladores de donde proviene el agua.

Los problemas actuales del deterioro acelerado de la naturaleza,

que se viene manifestando con cambios considerables del clima, la disminución de la biodiversidad, la reducción creciente de los recursos como el agua, hace urgente que los esfuerzos se reorienten a su máxima utilización tal como se reflejan en los objetivos planteados en la Cumbre mundial sobre el desarrollo ambiental realizado el año 2002 en Johannesburgo, Sudáfrica, y que coadyuva también los recientes planteamientos del Presidente del Consejo de Ministros Yehude Simons sobre las políticas de una gestión ambiental eficiente.

El panorama descrito orienta a la investigación a centrar sus esfuerzos en la búsqueda de nuevas fuentes de energía renovable y a la búsqueda de sistemas que puedan lograr su máximo aprovechamiento.

En nuestro país y principalmente en el valle del mantaro existen grandes canales de irrigación donde por la falta de tecnologías adecuadas se pierde grandes cantidades de agua.

La agricultura usa aproximadamente el 85% de agua dulce pero fundamentalmente en riego por inundación, aspecto que contribuye a la escasez creciente del agua; por lo que urge que se desarrollen sistemas de riego tecnificado a gran escala.

La pico turbina de eje vertical se perfila como una máquina que puede aprovechar la energía de los canales de irrigación ya sea para su aprovechamiento en generación de energía eléctrica o también en el bombeo de agua que pueda proveer la presión

suficiente para su utilización en sistemas de riego tecnificado.

El uso de este tipo de turbina es prácticamente inexistente en nuestro valle del mantaro por lo que es importante investigar su funcionamiento con la maximización de su rendimiento con el apoyo de herramientas de investigación experimental como el diseño factorial.

En el experimento factorial se investigan simultáneamente los efectos de cierto número de diferentes factores. La necesidad de estudiar conjuntamente varios factores obedece principalmente a dos razones:

- a. Encontrar un modelo que describa el comportamiento general del fenómeno en estudio. Esto se restringe al rango de variación de los niveles de los factores.
- b. Optimizar la respuesta o variable dependiente, es decir, encontrar la combinación de niveles de los factores que optimizan esa respuesta.

Los tratamientos en el análisis factorial consisten en todas las combinaciones se forman de los distintos niveles de los factores. Por ello, la característica esencial que hace necesario el estudio conjunto de factores es la posibilidad de que el efecto de un factor cambie en presencia de los niveles de otro factor, es decir, que los factores interactúen, lo cual conlleva al concepto de interacción entre ellos.

Si se estudia un factor en forma separada el resultado puede ser diferente al que daría con un estudio conjunto, y es más difícil describir el comportamiento general o encontrar el óptimo.

1.2. ANTECEDENTES

En el IX ENCUENTRO LATINOAMERICANO Y DEL CARIBE SOBRE PEQUEÑOS APROVECHAMIENTOS HIDROENERGETICOS, realizado en la ciudad Neuquen, Argentina en el año 2001, donde se tuvo como objetivo central el de reunir investigadores sus trabajos de investigación en el campo de los pequeños aprovechamientos hidroenergéticos, promover discusiones sobre los diferentes aspectos de la temática de los recursos en energías renovables y su problemática, alentar a la interacción y la colaboración entre profesionales e investigadores provenientes del sector universitario, industrial, organizaciones no gubernamentales y del ámbito gubernamental, tanto del orden nacional como internacional.

En este congreso se presentó el diseño de un modelo de micro turbina hidráulica portátil, donde la investigación se centró en el estudio de los rotores hidrodarrieus (Davies, 1989); (Takamatsu etal, 1992). La hipótesis de trabajo aplicadas se fundamentaron en la teoría aerodinámica de los rotores Darrieus de eje vertical de R.J Templin (Strickland, 1976); citados por Dolling O. (2001), en la conferencia número 25 del IX congreso citado. En realidad la

patente de los rotores Darrieus data de 1925 (Francia) y 1926 (Estados Unidos de America); sin embargo recién en 1960 la National Research Council of Canada comienza el desarrollo de esta tecnología.

1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo se puede optimizar el rendimiento de una picoturbina de eje vertical, con la aplicación del diseño factorial en el valle del Mantaro?

1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.

El presente trabajo de investigación encuentra su justificación en los siguientes aspectos:

-) Orientar la investigación de la Ingeniería Mecánica en la búsqueda de nuevas formas de generar energías renovables.
-) Implementar sistemas para utilizar al máximo recursos hídricos.
-) La relevancia social es muy importante, porque puede generar energía eléctrica y bombear agua para uso principalmente en zonas rurales, planteando una solución a necesidades de energía de miles de personas.

-) Los canales de irrigación del valle del Mantaro conducen grandes cantidades de agua, desperdiciándose en un gran porcentaje porque los campesinos los usan mayoritariamente en riego por inundación.
-) Muchos terrenos de siembra, por su ubicación geográfica, en muchos casos a un solo metro de altura de desnivel, no se puede aprovechar el agua de los canales, pudiendo hacerlo con pico centrales como la turbina materia de este trabajo.
-) El uso de tecnologías de riego también sería posible porque se podría bombear agua para darles la presión necesaria para su uso.
-) La presente investigación con la aplicación de herramientas estadísticas de análisis inferencial podrán dar las pautas necesarias para estudiar pico turbinas de manera experimental y poderlas replicar a otros sistemas.

1.5. OBJETIVOS.

1.5.1. Objetivo general:

Optimizar el rendimiento de una pico turbina de eje vertical con la aplicación del diseño factorial en el valle del Mantaro.

1.5.2. Objetivos específicos:

- a) Analizar el rendimiento de un pico turbina de eje vertical.
- b) Elaborar matrices experimentales utilizando el diseño factorial.
- c) Evaluar los efectos de las variables con respecto a la variable respuesta.
- d) Validar la hipótesis y el modelo experimental mediante el teorema de Cochran y el análisis de residuos.
- e) Elaboración del prototipo.

1.6. HIPÓTESIS:

Con la aplicación del diseño factorial se optimiza el rendimiento de la pico turbina de eje vertical en el valle del Mantaro.

VARIABLE INDEPENDIENTE:

Diseño factorial

VARIABLE DEPENDIENTE:

Rendimiento de la pico turbina de eje vertical

1.7. METODOLOGIA.

Tipo de Investigación: Aplicada

Nivel de investigación: Estudio de comprobación de hipótesis causales.

Método básico de investigación: Método experimental

Diseño de investigación: Por el número de variables independientes corresponde a un diseño multivariado, por el método que se emplea diseño experimental, diseño factorial.

1.8. POBLACION Y MUESTRA.

1.8.1. POBLACION.

La población es el conjunto total de turbinas que conforman la unidad de investigación experimental

1.8.2. MUESTRA.

La muestra es no probabilística intencional. (Pico turbina de eje vertical).

CAPITULO II

ENERGIA A PEQUEÑA ESCALA

2.1. ENERGÍA A PEQUEÑA ESCALA

La Organización de las naciones unidas para el desarrollo industrial (Onudi 2002), en un Análisis de la energía hidroeléctrica a pequeña escala explica que no hay un consenso universal sobre la definición de energía hidroeléctrica a pequeña escala. Una definición comúnmente aceptada es que se trata de una planta hidroeléctrica con capacidad de hasta 10 MW, pero en EE. UU. y Brasil, por ejemplo, el límite asciende hasta 30 MW. En la parte inferior de la clasificación de la energía hidroeléctrica a pequeña escala, las definiciones se subdividen en mini hidráulicas para menos de 500 kW,

micro hidráulicas para menos de 100 kW y pico hidráulicas para 10 kW o menos.

Las plantas de energía hidroeléctrica a pequeña escala tienen una larga vida útil, como ha quedado demostrado por la exitosa rehabilitación de numerosos proyectos. Los costes de un proyecto se pagan casi totalmente por adelantado, con unos costes de mantenimiento y funcionamiento fijos y predominantemente bajos a lo largo de su vida útil. Puede haber también mayores beneficios, como un control más amplio sobre inundaciones, regadío y almacenamiento y suministro de agua.

Cuando las plantas de energía hidroeléctrica a pequeña escala requieren un embalse, se ha descubierto que usan mucho más espacio de embalse por unidad de energía producida que las plantas de energía hidroeléctrica de mayor tamaño. Por término medio, las plantas de capacidad menor a 100 MW usan 249 hectáreas por megavatio (ha/MW), mientras que los proyectos más grandes, que producen entre 3.000 y 18.000 MW, sólo ocupan 32 ha/MW.

La introducción de electricidad en comunidades remotas en los países en vías de desarrollo con terreno difícil ha sido posible tan solo mediante planes descentralizados de energía hidroeléctrica a pequeña escala. La iluminación de los hogares y zonas de los alrededores es la principal aplicación de la electricidad generada por tales proyectos, y proporciona tanto beneficios sociales como económicos.

El uso de la energía hidroeléctrica a pequeña escala puede contribuir a la reducción de la pobreza mediante un desarrollo socioeconómico sostenible, aumentando las oportunidades de empleo para la población local, mejorando el nivel de vida en las zonas rurales y promocionando un desarrollo respetuoso con el medio ambiente.

2.2. SOLUCIONES HIDROELÉCTRICAS SOSTENIBLES

Hay tres opciones para incrementar la capacidad de generación eléctrica a partir de la energía hidráulica que son especialmente sostenibles y rentables: acompañarse de una fuente de energía alternativa, añadir capacidad hidroeléctrica la infraestructura existente y prolongar la vida útil e incrementar la eficiencia operativa de los proyectos hidroeléctricos existentes.

2.3. ACOMPAÑAMIENTO CON FUENTES DE ENERGÍA ALTERNATIVAS

La fiabilidad y la flexibilidad de funcionamiento de la energía hidroeléctrica hacen que ésta sea idónea para funcionar en tándem con fuentes alternativas de energía, lo que quiere decir que la hidroelectricidad puede desempeñar un papel esencial en el desarrollo de estas jóvenes industrias. Muy pocas pueden proporcionar el constante y garantizado suministro de energía que la red eléctrica requiere, pero cuando éstas van acompañadas de energía hidroeléctrica pueden suministrar de forma efectiva

electricidad al sistema, proporcionando incentivos financieros para el desarrollo de estos sectores.

Cuando los aerogeneradores o los paneles solares están inyectando energía a la red, las centrales hidroeléctricas pueden reducir su propia generación y almacenar reservas adicionales de agua en sus embalses. Estas reservas pueden ser entonces utilizadas para incrementar la generación de energía hidroeléctrica y subsanar la deficiencia cuando el viento desaparece o el sol es cubierto por las nubes y cae la generación de estas fuentes. Esto queda bien ilustrado por los grandes proyectos combinados de energía eólica e hidráulica en Tasmania.

2.4. ENERGIA HIDROELECTRICA A PEQUEÑA ESCALA EN CHINA

China es conocida por sus grandes planes de energía hidráulica, como por ejemplo la central energética de Xiaolangdi en el Río Amarillo, que genera 1.800 megavatios de electricidad, y la planificada central de energía de la recién terminada presa de Las Tres Gargantas en el río Yangtsé, la cual generará hasta 16.000 MW. Sin embargo, China ha atraído también la atención internacional gracias a su desarrollo de energía hidroeléctrica a pequeña escala para la electrificación rural.

Aproximadamente la mitad de todas las plantas de energía hidroeléctrica a pequeña escala del mundo se encuentran en China. Aunque el potencial total de desarrollo factible de energía

hidroeléctrica a pequeña escala es aproximadamente de 100.000 MW en toda China, la mayor parte del reciente rápido desarrollo se ha localizado en el sudeste y sudoeste del país. Hacia finales de 2002, China había instalado 28.489 MW de capacidad a través de la construcción de 42.221 centrales de energía hidroeléctrica a pequeña escala. Las características que hacen única la política china de energía hidroeléctrica a pequeña escala pueden definirse por los siguientes rasgos:

- Su enfoque descentralizado.
- Su uso de estructuras de redes locales (o minirredes).
- Las políticas y estrategias específicas que adopta, en particular las políticas globales de autoconstrucción, autogestión y autoutilización para este tipo de centrales.
- La popularización de un sistema de inversión en acciones.
- Su uso de tecnologías y equipamiento económicos, el recurso a fabricantes autóctonos de equipamiento y la importancia concedida a la formación.

La energía hidroeléctrica a pequeña escala representa actualmente alrededor del 30% del total de la capacidad de energía hidroeléctrica de China.

Trescientos millones de personas en China utilizan actualmente electricidad derivada de la energía hidroeléctrica a pequeña escala.

La mejora en el acceso a la electricidad en zonas rurales remotas ha sido espectacular: 28 millones de personas en China no tenían

electricidad en el año 2000, y esta cifra bajó a 10,15 millones a finales del año 2002.

Casi la mitad de los generadores de energía hidroeléctrica a pequeña escala en China están conectados a minirredes locales (en especial en las zonas montañosas), mientras que sólo un 10% están conectados a la red nacional. El resto de las centrales de energía hidroeléctrica a pequeña escala operan aisladas. El 44% de los proyectos de energía hidroeléctrica a pequeña escala de China corresponden a la categoría de energía micro hidráulica, con una capacidad de menos de 100 kW. Otro 46% son de energía mini hidráulica, con una capacidad de hasta 500 kW. Los proyectos de energía hidroeléctrica a pequeña escala más grandes – con una capacidad que va de los 500 Kw a los 25 MW – constituyen el 10% restante de los proyectos, pero representan el 75% de la producción eléctrica.

La construcción de redes locales basadas en energía hidroeléctrica a pequeña escala para servir a áreas rurales específicas, constituye un sistema de suministro de electricidad único desarrollado por China. El nivel de electrificación en los pueblos y en los hogares rurales aumentó de un 78,1% y un 65,3% en 1985 a un 97,7% y un 97,5% respectivamente en 2002. La calidad del suministro de electricidad mejoró, y las tarifas se redujeron hasta equipararse con las de los centros urbanos.

Existen dos tipos de centrales de energía hidroeléctrica a pequeña escala: las realizadas con la inversión de Gobiernos locales, que las gestionan y poseen, y las llevadas a cabo por pequeños productores independientes de energía eléctrica con inversión privada. La distribución de las centrales de energía hidroeléctrica a pequeña escala en China, de acuerdo con la capacidad instalada, modo de funcionamiento y propiedad.

El rápido desarrollo de la energía hidroeléctrica a pequeña escala en China puede atribuirse a lo siguiente:

- **Políticas preferentes:** el Gobierno chino introdujo muchas políticas preferentes para la energía hidroeléctrica a pequeña escala, como reducciones de impuestos, concesión de préstamos y subvenciones del Gobierno, ayuda a las empresas privadas para invertir en centrales de energía hidroeléctrica a pequeña escala y políticas de protección de las zonas de suministro hídrico y de la propiedad. La relación entre las inversiones del Gobierno central en energía hidroeléctrica a pequeña escala y las contribuciones privadas o individuales es de sólo 1 a 24.
- **Capacidad de fabricación autóctona:** En vista del hecho de que los costes de equipamiento constituyen el mayor porcentaje del coste total del desarrollo de la energía hidroeléctrica a pequeña escala, a diferencia de las grandes centrales hidroeléctricas, donde las obras públicas

normalmente suponen un porcentaje mayor, el Gobierno chino decidió promocionar la fabricación local para poder reducir el coste de las centrales de energía hidroeléctrica a pequeña escala en desarrollo.

- **Reconocimiento de las ventajas de la energía hidroeléctrica a pequeña escala sobre la energía hidroeléctrica a gran escala**

China sabe desde hace mucho tiempo que la energía hidroeléctrica a pequeña escala tiene sus propias ventajas peculiares que no pueden alcanzarse a través de una generación de energía hidroeléctrica a gran escala.

2.5. ENERGÍA HIDROELÉCTRICA A PEQUEÑA ESCALA EN NEPAL

En Nepal, donde cerca del 83% del terreno es montañoso, la extensión de la red no es normalmente rentable, dado el alto coste y el factor de baja carga inherente al abastecimiento de energía a asentamientos remotos y dispersos. La energía hidroeléctrica a pequeña escala de menos de 100 kW (micro hidráulica), y menos de 5 kW (pico hidráulica) puede ser utilizada en circunstancias donde las condiciones hidrológicas sean las adecuadas (disponibilidad y pendiente del flujo del agua). Cerca de 2.000 generadores de energía hidroeléctrica a pequeña escala generan 13 MW a la vez que suministran energía mecánica.

Otros 40 pequeños proyectos administrados por la Autoridad Eléctrica de Nepal proporcionan 19 MW de capacidad instalada. El Gobierno, en su décimo plan quinquenal (2002-2007), se ha impuesto el objetivo de producir otros 10 MW adicionales de electricidad por medio de planes micro hidráulicos descentralizados, proporcionando así electricidad fuera de la red al 12% de la población, en su mayoría en zonas rurales montañosas, que está actualmente sin cubrir.

Generalmente, los planes de electrificación micro o pico hidráulica en Nepal pertenecen a la comunidad o son privados. Puesto que se requiere una cantidad importante de inversión de capital y de organización para establecer un plan micro hidráulico, es más común que la comunidad se una con el fin de conseguir el capital necesario para construir un modelo que sirva a su pueblo que la construcción de micro plantas hidráulicas con capital privado. Los planes dirigidos por la comunidad tienen también más probabilidades de recibir el apoyo de organizaciones no gubernamentales. Sin embargo el Gobierno concede subvenciones sin tener en cuenta a quién pertenece el proyecto. Se emplea una gran variedad de tecnologías en los planes micro y pico hidráulicos realizados a lo largo de todo el país. Los planes de energía hidroeléctrica de muy pequeño tamaño, como Peltric Sets, promovido por una empresa nepalí, Kathmandu Metal Industries, son muy populares por su simplicidad y su baja inversión de

capital. Los equipos son pequeñas turbinas verticales tipo Pelton y unidades modulares de generación inductiva muy pequeñas (a menudo menores de 2 kW), que necesitan muy poca obra para su instalación. Las tuberías de polietileno, generalmente utilizadas para el abastecimiento del agua y propósitos de riego, dirigen el agua a la turbina desde un canal directamente procedente del río o en ocasiones desde un pequeño embalse. A partir de 2001, cerca de 700 proyectos como éste fueron instalados en varias partes de Nepal. Para proyectos más grandes de electrificación, de hasta 100 kW, Pelton y Crossflow son las turbinas más populares. Existen casi veinte fabricantes de micro y pico turbinas y otros componentes en el país. Todos los equipos requeridos se fabrican localmente en Nepal.

CAPITULO III

ANALISIS FACTORIAL

3.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES

Ferre J. (2002) de la Universidad Rovira i Virgili nos indica que para optimizar procesos de fabricación, condiciones de reacción y métodos de análisis entre otros, es necesario conocer qué variables influyen significativamente en el sistema y cómo afectan. A menudo esta información no está disponible y se genera experimentando. Primero se recogen en una lista todas las variables que podrían influir en la respuesta. A continuación, se realizan una serie de experimentos en los cuales se fijan las variables que no interesa modificar, se anota el

valor de las que no se pueden controlar, y se varían las restantes. Finalmente, se obtiene la información comparando la variación de la respuesta entre experimentos.

El elevado coste de la experimentación y las limitaciones de tiempo obligan a ejecutar sólo los experimentos imprescindibles. Y el método tradicional de variar un factor cada vez no suele ser la mejor opción. Puede implicar más experimentos de los necesarios y, a pesar de ello, proporcionar sólo información parcial. Por ejemplo, no mostrará si existe interacción entre factores. Las interacciones suelen ser muy corrientes y a veces son los efectos más importantes, por lo que conocerlas es imprescindible para comprender el comportamiento de muchos sistemas.

El diseño estadístico de experimentos contempla una amplia variedad de estrategias experimentales que son óptimas para generar la información que se busca. Hoy introduciremos una de estas estrategias: el **diseño factorial completo 2^k** . Éste describe los experimentos más adecuados para conocer simultáneamente qué efecto tienen k factores sobre una respuesta y descubrir si interaccionan entre ellos.

Estos experimentos están planeados de forma que se varían simultáneamente varios factores pero se evita que se cambien siempre en la misma dirección. Al no haber factores correlacionados se evitan experimentos redundantes. Además, los experimentos se complementan de tal modo que la información buscada se obtiene

combinando las respuestas de todos ellos. Esto permite obtener la información con el mínimo número de experimentos (y por tanto, con el menor coste) y con la menor incertidumbre posible (porque los errores aleatorios de las respuestas se promedian).

3.2. DISEÑOS FACTORIALES A DOS NIVELES

Uno de los diseños experimentales más utilizados en la práctica industrial para estudiar el efecto de varios factores (variables de interés) sobre una respuesta (característica estudiada), son los diseños factoriales a dos niveles (valores que puede tomar cada factor), también conocidos como diseños factoriales 2^k .

Estos diseños se caracterizan por plantear experimentos en todas las combinaciones de valores de los factores, y como cada factor toma 2 valores distintos, si el número de factores es k , el número total de experimentos a realizar será 2^k . Por ejemplo, un diseño factorial 2^3 (con 3 factores) requiere la realización de 8 pruebas experimentales, que denominamos “experimentos” o, en Latinoamérica, “corridas”.

Los dos niveles de los factores se representan con los signos $-$ y $+$, o con los valores -1 y $+1$ (o simplemente 1). Para los factores cuantitativos el signo $-$ representa al factor en su nivel bajo y el signo $+$, en su nivel alto. Para los factores cualitativos, la asignación de los signos $-$ y $+$ a cada nivel se realiza de forma arbitraria.

3.3. EXPERIMENTOS FACTORIALES

El termino experimento factorial o arreglo factorial hace referencia a la constitución de los tratamientos o combinaciones de tratamientos que se desean comparar. Este término no afecta lo que se conoce como diseño de tratamiento, pues este se refiere a la selección de factores que se desean estudiar los niveles de los factores a ensayar y combinación de estos.

De esta forma se debe dejar en claro que el diseño de tratamientos es independiente del diseño experimental, el cual hace referencia a la manera en que los tratamientos se aleatorizan a las diferentes unidades experimentales y la forma como se controla la variabilidad natural de las mismas. Así el diseño experimental puede ser completamente aleatorizado, bloques completamente aleatorizados, cuadros latinos, etc., y para cada uno de estos diseños se puede tener un arreglo factorial.

En muchos experimentos el éxito o fracaso del ensayo depende más de la selección de los tratamientos que se desea comparar que de la elección del diseño. Sin embargo, la selección de ambos (del diseño y de los tratamientos) es importante por tanto ninguno de los dos debe descuidarse en la planeación del experimento.

En un experimento factorial se investigan simultáneamente los efectos de cierto número de diferentes factores. La necesidad de estudiar conjuntamente varios factores obedece principalmente a dos razones:

- a. Encontrar un modelo que describa el comportamiento general del fenómeno en estudio. Esto se restringe al rango de variación de los niveles de los factores.
- b. Optimizar la respuesta o variable independiente, es decir, encontrar la combinación de niveles de los factores que optimizan esa respuesta.

Los tratamientos en el análisis factorial consisten en todas las combinaciones se forman de los distintos niveles de los factores. Por ello, la característica esencial que hace necesario el estudio conjunto de factores es la posibilidad de que el efecto de un factor cambie en presencia de los niveles de otro factor, es decir, que los factores interactúen, lo cual conlleva al concepto de interacción entre ellos.

Si se estudia un factor en forma separada el resultado puede ser diferente al que daría con un estudio conjunto, y es mas difícil describir el comportamiento general o encontrar el optimo.

Algunas de las ventajas de esta clase de experimentos son:

- i. Al obtener información sobre varios factores sin aumentar el tamaño del experimento hay economía en el material experimental.
- ii. Se amplía la base de la inferencia en relación a un factor ya que se estudia en las diferentes condiciones representadas por los niveles de otros factores.
- iii. Se puede obtener una estimación de la interacción de los efectos, o sea, se determina el grado y la forma en la cual se modifica el efecto de un factor en presencia de los niveles de los otros factores.

iv. El conjunto de los tratamientos en el diseño factorial es óptimo para estudiar efectos principales e interacciones.

Y entre las desventajas más importantes se destacan:

- i. El gran número de combinaciones de tratamientos cuando se estudian muchos factores a muchos niveles. Esto tiene dos efectos:
 - a) Si se desea usar bloques completos es difícil encontrar grupos de unidades experimentales homogéneos para asignar todos los tratamientos, esto se puede eliminar usando el principio de confusión.
 - b) Se aumenta el costo del experimento al tener muchas unidades experimentales, problema que se minimiza usando experimentos factoriales fraccionados, en este caso, se prueba solo una parte de los tratamientos posibles.
- ii. Difícil interpretación principalmente de las interacciones de orden superior (interacciones de más de tres efectos).

3.4. DISEÑOS FACTORIALES 2^k

Los diseños factoriales se usan ampliamente en experimentos que incluyen varios factores cuando es necesario estudiar el efecto conjunto de los factores sobre la respuesta. Hay varios casos especiales del diseño factorial que son importantes debido a su uso generalizado en el trabajo de investigación y porque constituyen las bases de otros diseños de gran valor práctico.

El más importante de estos casos especiales es el de k factores, cada uno con sólo dos niveles. Si todos los factores se estudian con

dos niveles, se dice que es un experimento factorial 2^k . Los niveles de estos factores pueden ser cuantitativos o bien cualitativos.

La selección de únicamente dos niveles puede conducir a inferencias erróneas.

Así cuando la respuesta se afecta en forma cuadrática, los niveles estudiados pueden indicar que no efecto del factor. Este es un riesgo que se corre al usar dos niveles por factor.

En el caso de $k = 2$, se tiene el factorial más sencillo 2^2 , el modelo estadístico para este modelo sería:

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + e_{ijk}$$

$$= \mu + s + e_{ijk}$$

donde, $s = \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij}$, $i, j = 0; 1; k = 1; 2; \dots; n_{ij}$ con $n_{ij} \geq 0$ el número de replicas. El anterior experimento está asociado a un diseño factorial completamente aleatorizado.

3.5. DISEÑO FACTORIAL 2^2

El primer diseño del tipo 2^k es el que solo tiene dos factores, por ejemplo, A y B; cada uno tiene dos niveles. A este diseño se le llama diseño factorial 2^2 .

Los niveles de los factores pueden denominarse arbitrariamente "bajo" y "alto".

Se tienen cuatro tratamientos que se denotan por cualquiera de los siguientes:

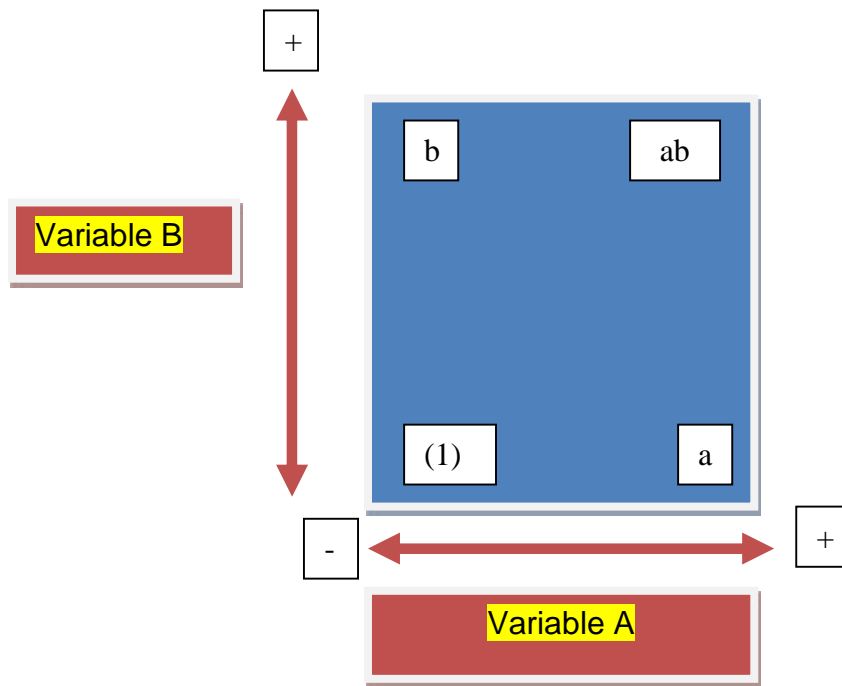


Figura 3.1. Combinaciones de tratamientos en los diseños 2^2

CAPITULO IV

CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

4.1. LA ENERGÍA DEL AGUA

Desde hace mucho tiempo atrás, se ha aprovechado las fuerzas de la naturaleza para poder ayudar en los trabajos que se desarrollaban, consiguiendo de este modo una mejora en la vida de las personas ya que se podían realizar cantidades de trabajo importantes que hubiesen necesitado abundante mano de obra.

Refiriéndonos a las caídas de las masas de agua, producidas por los desniveles existentes en los cauces por donde discurrían, fueron utilizadas para producir energía mecánica por medio de paletas y cajones, estos sistemas ayudaban a elevar agua en los riegos, para mover molinos, etc.

Una determinada masa de agua, al caer de una determinada altura, produce un trabajo. Esta energía no es toda útil ya que existen pérdidas que le afectan, en la actualidad algunas de las turbinas existentes en el mercado permiten unos rendimientos superiores a 85%.

Los aprovechamientos de los saltos de agua tiene lugar, no por la velocidad de ésta, sino por la presión que puede obtenerse conduciéndola a un punto elevado en relación con la altura de la toma de agua, y desde donde desciende para obtener en su caída el trabajo aprovechable.

4.2. LAS DIFERENTES CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

Existen diversos sistemas de producción de energía eléctrica mediante centrales hidroeléctricas. Estos sistemas se pueden clasificar según su rango de potencia instalada:

Tabla 4.1. Clases de centrales hidroeléctricas

CLASE	RANGO DE POTENCIA
Pico Hidroeléctrica	Hasta 10 Kw
Micro Hidroeléctrica	10 a 100 Kw
Mini Hidroeléctrica	100 kW a 1MW
Pequeña Hidroeléctrica	1 MW a 10 MW
Mediana Hidroeléctrica	10 MW a 100 MW
Gran Hidroeléctrica	Superior a 100 MW

Además, se pueden clasificar en dos grupos, centrales hidroeléctricas con caudal fluyente (de derivación) y centrales hidroeléctricas con caudales en parte retenidos, en uno o en varios embalses.

Las centrales que trabajan con caudal fluyente, son aquellas instalaciones que mediante una bocatoma, captan parte del caudal del río y lo conducen a través de canales hacia la turbina para aprovechar la energía del agua y después devolverla al cauce del río. Esta aplicación es la utilización más frecuente en aquellas centrales de mediana y pequeña potencia. Este tipo de centrales tiene un impacto en el medio ambiente mínimo, ya que al no bloquear el cauce del río, no inunda los terrenos adyacentes.

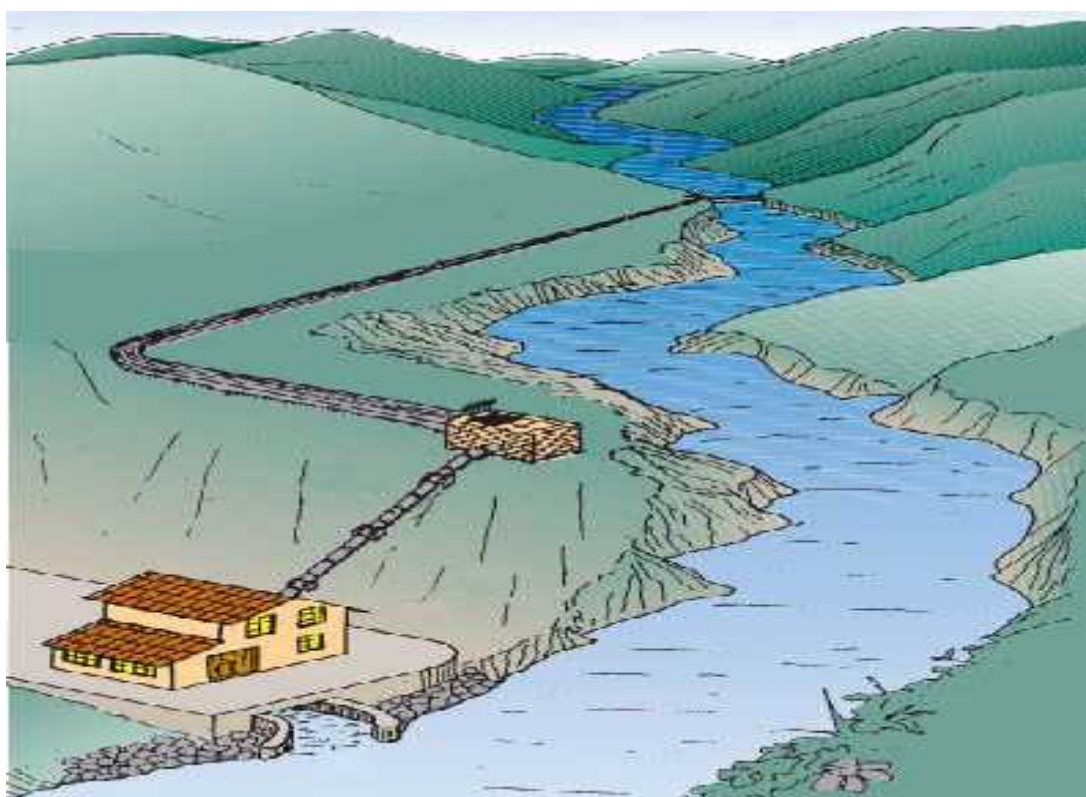


Figura 4.1. Esquema de una central de agua fluyente o de derivación

Por otra parte, las centrales hidroeléctricas a pie de presa tienen la opción de almacenar toda la energía del agua de un río mediante un embalse. En estas centrales, se regulan los caudales de salida para utilizarlos cuando sea necesario, en un sistema eléctrico serían centrales punta, así que generará electricidad en aquellos momentos donde los consumos son más elevados. Estas centrales presentan varios inconvenientes, como son la inundación de terrenos fértiles y en ocasiones poblaciones que es preciso evacuar y la fauna acuática puede ser alterada si no se toman medidas adecuadas. Estas aplicaciones se suelen utilizar en centrales de mediana y gran potencia donde el caudal aprovechado por las turbinas es proporcionalmente muy grande al caudal promedio anual del que el río dispondría.

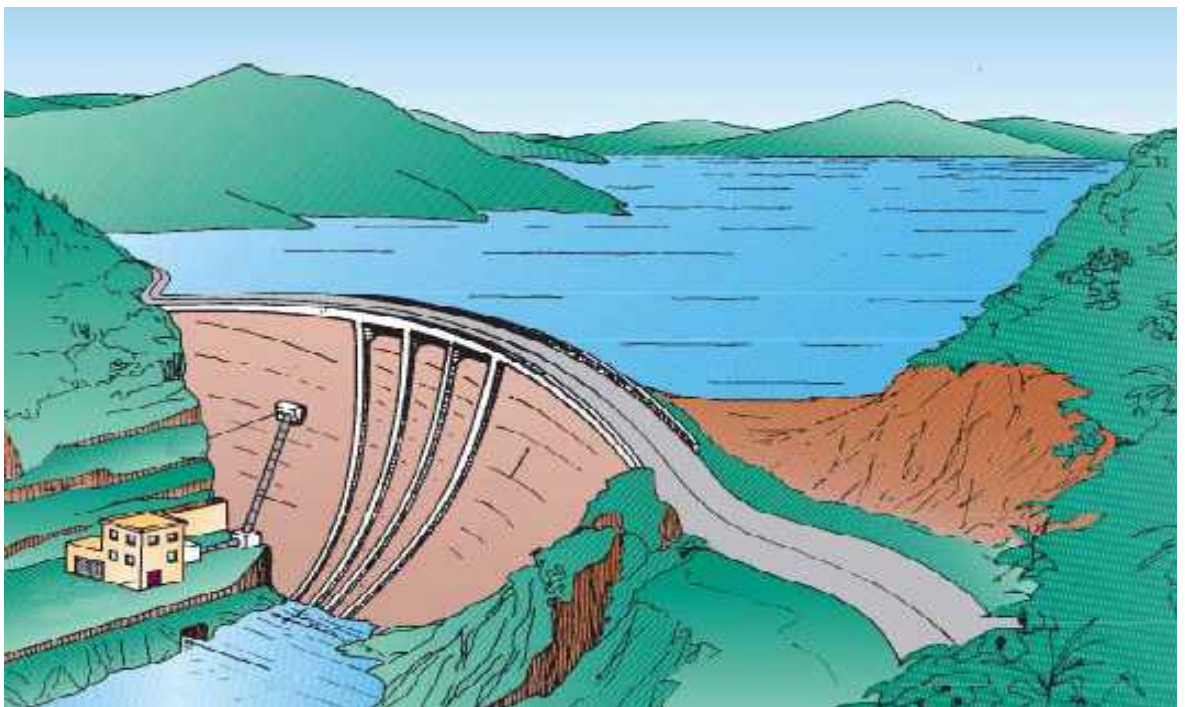


Figura 4.2. Esquema de una central a pie de presa o caudal retenido

Las centrales de agua fluyente o de derivación tienen ciertas ventajas frente a las centrales a pie de presa o de caudal retenido.

Estas ventajas son las siguientes:

Tabla 4.2. Ventajas de centrales de agua fluyente ante las de pie de presa

Centrales de agua fluyente o derivación	Centrales a pie de presa o de caudal retenido
Son diseñadas para el caudal mínimo	Se precisa inundar parte del terreno
Es posible administración local	Administración centralizada
Uso de tecnologías locales y capacidades locales	Uso de tecnologías importadas y capacidades importadas
Impacto ambiental reducido	Gran impacto ambiental

Para una zona rural subdesarrollada, el sistema a instalar más utilizado son las centrales hidroeléctricas de agua fluyente. Aunque presentan ventajas ante las otras centrales a pie de presa, individualmente disponen de una serie de ventajas e inconvenientes.

4.3 VENTAJAS E INCONVENIENTES DE UNA CENTRAL DE AGUA FLUYENTE

4.3.1 Ventajas

- 1) Es una fuente limpia y renovable de energía.
- 2) Es un recurso ampliamente disponible en muchos de los sitios de Sudamérica.
- 3) Bajos costos de operación.

- 4) Generación de energía generalmente continúa.
- 5) Funcionamiento a temperatura ambiente.
- 6) Son centrales eficientes (75%-90%).
- 7) Larga vida útil.
- 8) Se pueden combinar con sistemas de riego.
- 9) Permite el desarrollo productivo y económico de la comunidad.

4.3.2 Inconvenientes

- 1) Presentan un alto costo inicial.
- 2) Están condicionadas por las condiciones topográficas e hidrológicas del lugar, dado que las transmisiones a largas distancias se ven limitadas por el costo.
- 3) La potencia del suministro está condicionada por el recurso natural existente. Esto implica que es difícil la posibilidad de extender el suministro en caso de producirse una demanda mayor.
- 4) Es posible que según la temporada varíe el nivel del caudal, por lo tanto, es recomendable hacer un buen estudio hidrológico para evitar posibles problemas posteriores.
- 5) Necesidad de estudios técnico que implica un costo añadido.

4.4. EQUIPO ELECTROMECAÁNICO

4.4.1. Turbinas hidráulicas

La misión de las turbinas hidráulicas es transformar aquella energía potencial y cinética del agua en energía mecánica de rotación, de este modo, con la aplicación de un generador, se consigue transformar la energía mecánica producida por la turbina, en energía eléctrica.

4.4.2. Clases de turbinas hidráulicas

Turbina Pelton

La turbina Pelton fue inventada por el Sr. Lester Allan Pelton, original de California, en el año 1879, pero no fue hasta el 1880 cuando obtuvo su primera patente.

Son las turbinas de acción más utilizadas en aplicaciones donde se disponen de unos grandes saltos (de 20 metros a 1000 metros aprox.) y caudales relativamente pequeños (de $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$ a $20 \text{ m}^3/\text{s}$). Este tipo de turbinas permiten una gran flexibilidad de funcionamiento, al ser capaz de turbinar hasta el 10% de su caudal nominal y sus rendimientos llegan a ser superiores al 90%, además, su instalación puede ser tanto con eje horizontal, incluyendo 1 ó 2 inyectores, como con eje vertical, permitiendo de 3 a 6 inyectores.

En la siguiente figura se pueden observar los principales componentes de una turbina Pelton.

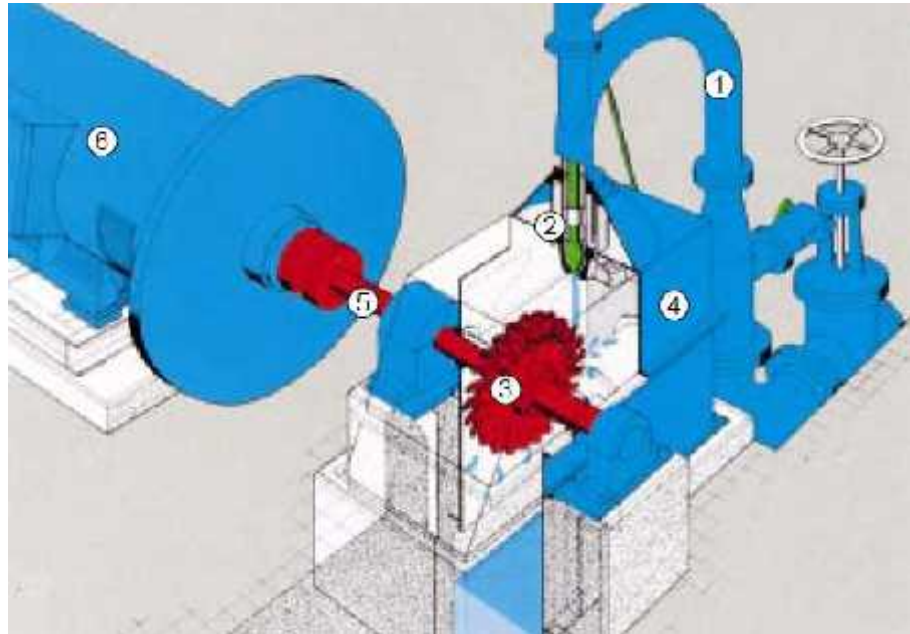


Figura 4.3. Esquema turbina Pelton

- 1) Tubería de distribución.
- 2) Inyector.
- 3) Rodete.
- 4) Carcasa de la turbina.
- 5) Eje de la turbina.
- 6) Generador.

La turbina está constituida por dos partes fundamentales que son el distribuidor y el rodete.

El distribuidor de la turbina, está formado por un inyector o varios inyectores que a su vez están formados por diferentes

elementos mecánicos, que dirigen el agua procedente de la tubería de distribución, a una gran velocidad tangencial sobre el rodete.

El número de inyectores colocados circunferencialmente alrededor de un rodete, depende de la potencia y características del grupo, según las condiciones del salto de agua. Así mismo, se puede disponer de más de un rodete en el mismo eje, cada uno de ellos dotado del distribuidor apropiado.

Estos inyectores constan de una tobera de sección circular de un diámetro aproximado entre 5 y 30 cm, instalada en la terminación de la tubería de distribución y proyecta y dirige, tangencialmente hacia el rodete el chorro del agua, de tal modo que la prolongación de éste forma un ángulo prácticamente de 90°.

Situado dentro de la tobera encontramos la válvula de aguja que se encarga de regular el caudal en el rodete. No son más que unos vástagos situados concéntricamente en el interior de la tobera, guiado mediante cojinetes sobre los cuales tiene un libre movimiento de desplazamiento longitudinal en los dos sentidos realizado por unos servomotores o palancas en uno de los extremos. El extremo situado en el orificio de salida regula el caudal de agua, de acuerdo con el mayor o menor grado de

acercamiento hacia el orificio, pudiendo llegar a cortar completamente el paso del agua.



Figura 4.4. Inyectores y rodete Pelton

Muchas de estas válvulas suelen estar dotadas de un deflector, cuya misión es desviar el chorro del agua, total o parcialmente, que incide sobre el rodete, para realizar maniobras de parada sin tener que cerrar bruscamente la válvula de aguja, reduciendo de ese modo los efectos del golpe de ariete y el posible embalamiento del mismo.

En las micro centrales que utilizan pequeñas turbinas, se puede llegar a prescindir de la válvula de aguja, y operar con una o más toberas con caudal constante, y en algunos casos manteniendo los deflectores.

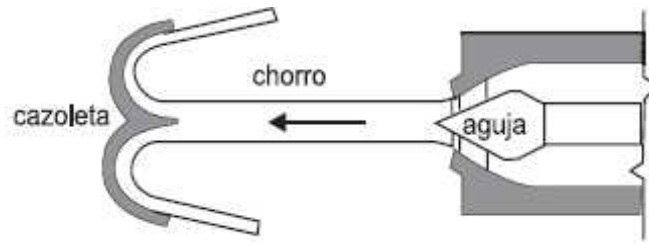


Figura 4.5. Esquema válvula de aguja

El rodete de la turbina, es una pieza circular maciza, fabricada generalmente por acero fundido, que consta de una serie de cucharas, también llamadas cazoletas o álabes, montadas en su periferia mediante soldadura o fundidas en una única pieza con el rodete y reciben el chorro del agua del inyector, de ese modo se produce la rotación del eje.

Tienen una forma similar a la de una doble cuchara, donde el chorro de agua incide en una arista interior lo más afilada posible, y situada centralmente en dirección perpendicular hacia el eje, de ese modo el álabe queda dividido en dos partes simétricas. En su extremo se encuentra una escotadura en forma de uve doble, perfectamente centrada, para conseguir que el álabe precedente reciba el chorro de agua cuando su arista se encuentra en posición lo más perpendicular posible, respecto al chorro.



Figura 4.6. Álabes del rodete Pelton

Tanto el rodete como la tobera, están protegidos por una carcasa que no sólo los protege, sino que impide la salida del agua después del impacto sufrido con los álabes. Seguidamente esta agua es evacuada mediante la cámara de descarga hacia el desagüe.

Existe una variante de la turbina Pelton, llamada turbina Turgo. A diferencia de la turbina Pelton esta dispone de inyectores inclinados 20° respecto al plano diametral del rodete.

El rodete de una turbina Turgo, para un mismo diámetro de chorro, es menor, consiguiendo de ese modo una mayor velocidad lo que facilita su acoplamiento directo al generador. Por lo contrario, su rendimiento no supera el 90%.

Turbina Kaplan y de hélice

Las turbinas del tipo Kaplan fueron diseñadas por Victor Kaplan, original de Austria y patentada en 1912.

Son turbinas de acción y de admisión total. Se utilizan para aprovechar pequeños saltos (de 1 metro a 30 metros aprox.) con caudales altos (de $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ a $1000 \text{ m}^3/\text{s}$).

La gama de funcionamiento es muy amplia siendo capaz de turbinar hasta el 25% del caudal nominal de la turbina y al igual que las turbinas Pelton disponen de un rendimiento superior al 90%.

En la siguiente figura se pueden observar los principales componentes de una turbina Kaplan.

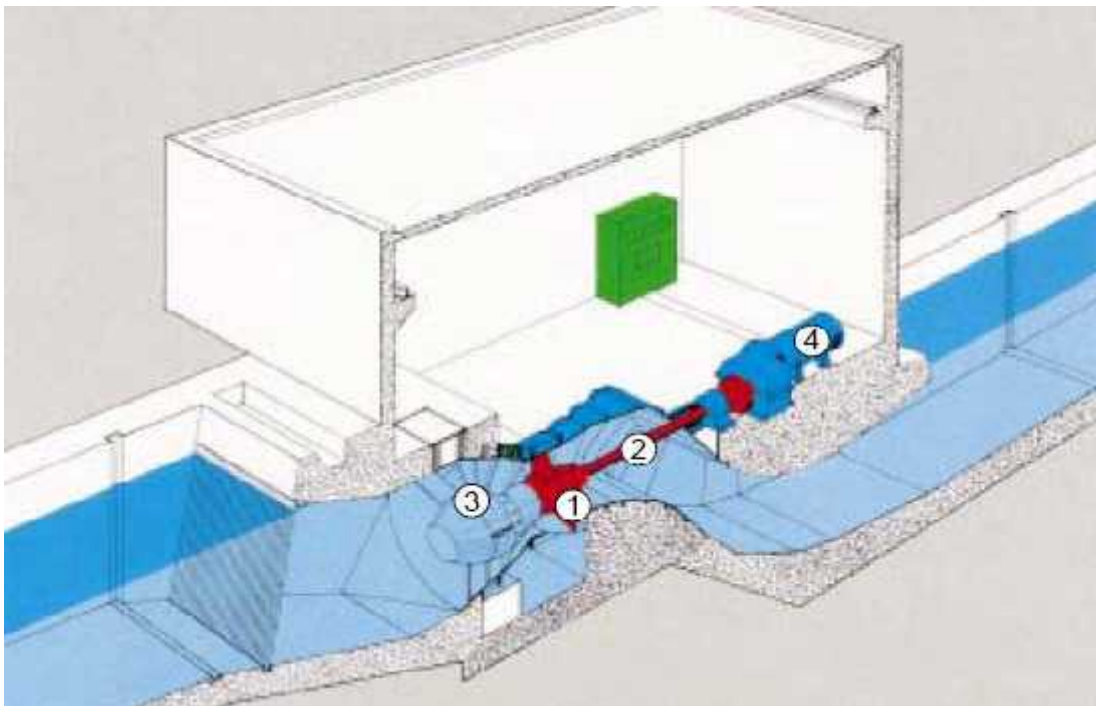


Figura 4.7. Esquema turbina Kaplan

- 1) Distribuidor y palas distribuidor.
- 2) Eje de la turbina.
- 3) Rodete.
- 4) Generador.

Se pueden diferenciar dos tipos de turbina Kaplan, la verdadera turbina Kaplan y la turbina Semi-Kaplan. Estas están diferenciadas por la regulación de los álabes del rodete y los álabes de los distribuidores.



Figura 4.8. Álabes distribuidores turbina Kaplan

En todas las turbinas Kaplan, los álabes del rodete son regulables (causa del elevado rendimiento), mientras que los álabes del distribuidor pueden ser fijos o regulables. En el

caso de que sean fijos, la turbina será Semi-Kaplan, en el caso contrario, estaremos hablando de una verdadera turbina Kaplan.

La regulación de los álabes se consigue mediante unas manivelas, que están asociadas a unas bielas articuladas que se desplazan con ayuda de un servomotor hidráulico. Esta regulación permite cambiar el ángulo de ataque de los álabes (con perfil de ala de avión) contra el agua y de este modo disponer de una velocidad constante independientemente del caudal.

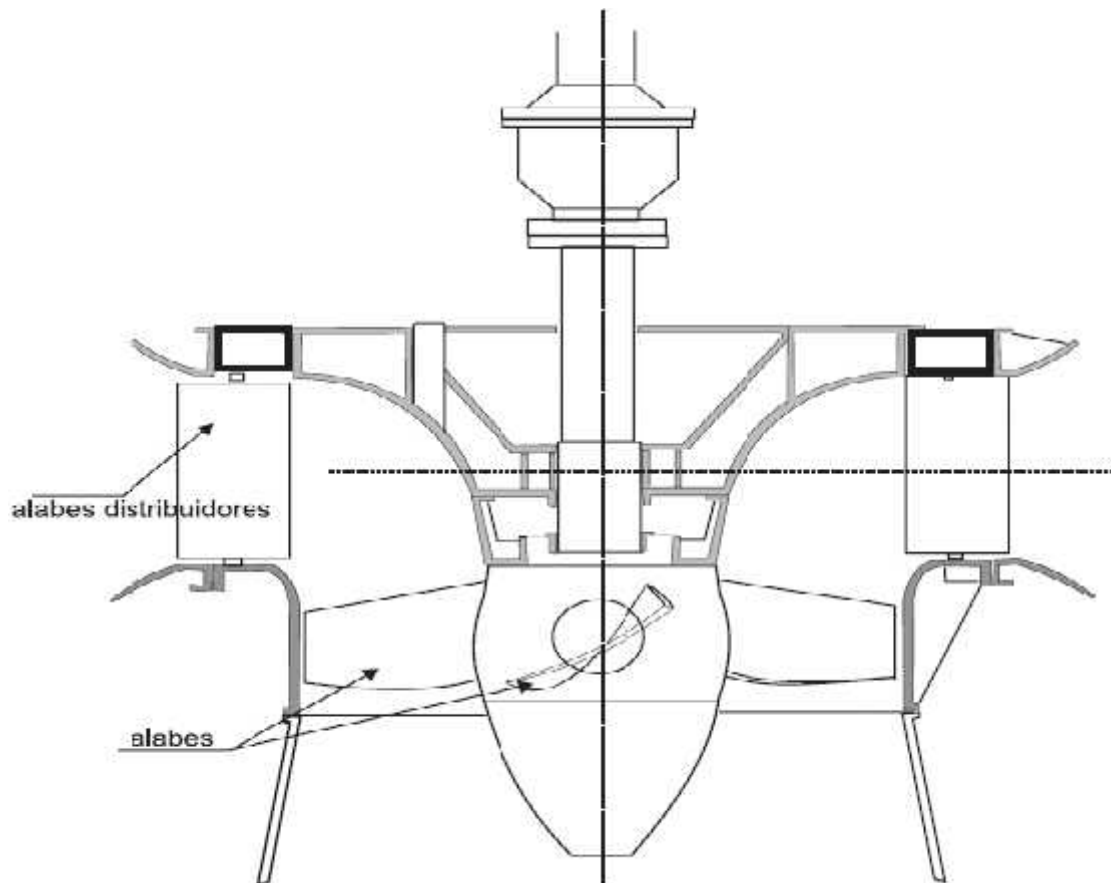


Figura 4.9. Turbina Kaplan

Normalmente al final de la turbina, se coloca un tubo de aspiración, generalmente fabricado con hormigón, para conseguir proporcionar al sistema de una mayor altura, y de ese modo una mayor potencia.

Las turbinas de hélice son usadas en aquellos casos donde el caudal y el salto son prácticamente constantes, ya que esta, no cuenta con álabes móviles, sino que ambos son fijos, causando de ese modo el abaratamiento del rodete pero perdiendo eficiencia.

Turbina Francis

Las turbinas Francis fueron diseñadas por James B. Francis, quien en el año 1848 consiguió hacer una gran mejora de eficiencia a partir de dos diseños anteriores, Benoit Fourneyron en 1826 y Samuel Howd en 1838.

Son turbinas de reacción y de admisión total. Son utilizadas para aprovechar saltos de altura media (de 4 metros a 300 metros aprox.) y una gran gama de caudales (de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ a $500 \text{ m}^3/\text{s}$). Las turbinas Francis, gracias a su gran rango de alturas y caudales, y siendo capaz de operar con rendimientos superiores al 90%, se han convertido en las turbinas de mayor aplicación en el mundo.

En la siguiente figura se pueden observar los principales componentes de una turbina Francis.

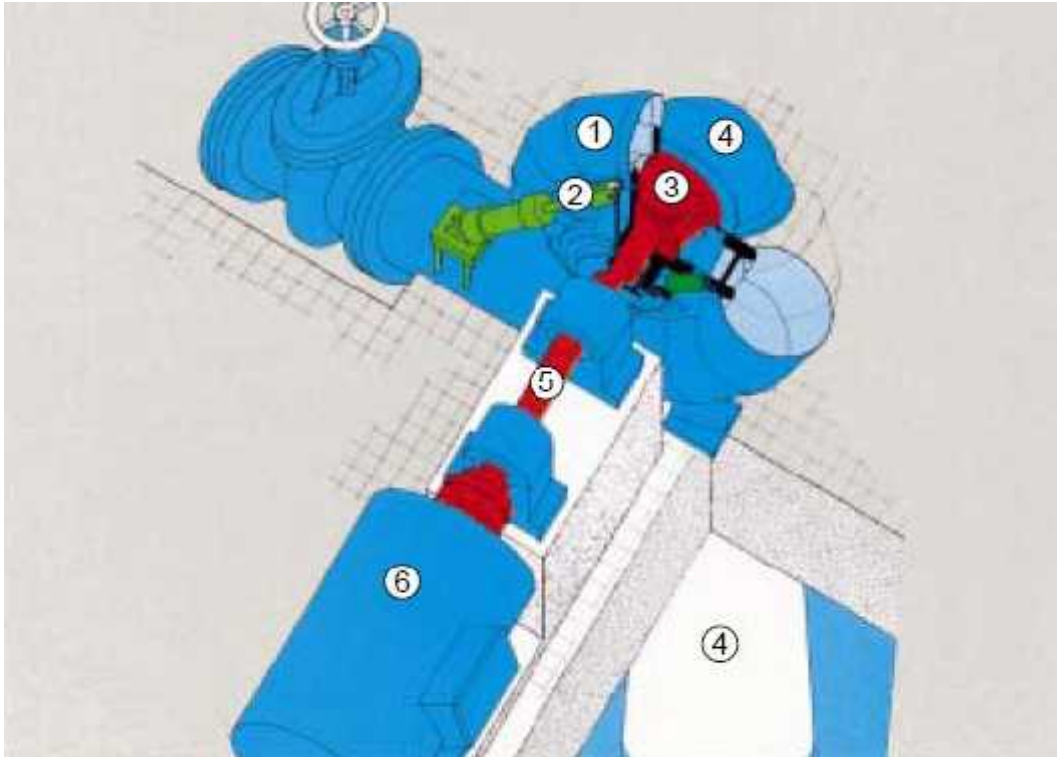


Figura 4.10. Esquema turbina Francis

- 1) Cámara espiral
- 2) Álabes móviles
- 3) Rodete
- 4) Tubo de aspiración
- 5) Eje de turbina
- 6) Generador

La turbina está constituida por cuatro partes fundamentales que son el distribuidor, el rodete, el tubo de aspiración y la cámara en espiral.

El agua es dirigida a los álabes del distribuidor mediante la cámara en espiral y conjuntamente hacen entrar el agua en el rodete a velocidad y orientación adecuada. Aunque existen varios diseños de cámaras, nos referimos a las cámaras en espiral, por ser la instalación más frecuente.

La cámara tiene una disposición en forma de caracol para conseguir que el agua circule a una gran velocidad constante y sin formar torbellinos. Esta agua es conducida hacia el rodete mediante unas palas fijas situadas en la periferia interior de la cámara denominado antedistribuidor.



Figura 4.11. Cámara en espiral turbina Francis

Los álabes del distribuidor, llamados álabes directrices son los encargados de distribuir y regular o cortar totalmente, el

caudal que fluye hacia el rodete con ayuda de servomotores que les proporciona el movimiento.

El rodete consta de una serie de álabes, que de lo contrario a las turbinas Kaplan, estos son siempre fijos.

Los álabes del rodete, normalmente son construidos de bronce o de aceros especialmente aleados, para evitar corrosiones y la cavitación. Su longitud y la mayor o menor inclinación, respecto al eje de la turbina, depende del caudal, de la altura del salto y por su velocidad específica.

En la siguiente figura se puede observar la parte de la salida del agua de una turbina Francis.



Figura 4.12. Turbina Francis

El agua que sale a través de los álabes del rodete va a parar a un deflector de forma cónica para evitar que la misma agua vuelva a chocar de nuevo contra los álabes. Esta, aún conserva una gran energía cinética que es aprovechada gracias a la colocación de un tubo de aspiración al igual que en la turbina Kaplan.

Las turbinas Francis, también se pueden utilizar en los rangos de coincidencia con las turbinas Pelton. El utilizar una turbina Francis representará una disminución del coste, ya que para mayores caudales su estructura es inferior y su velocidad más elevada, pero por el contrario, su eficiencia es menor y las reparaciones que se han de hacer por causa de la cavitación son más costosas.

4.4.3 Criterios de clasificación

a. Variación de la presión estática a través del rodete

La energía motriz que se genera en el rodete gracias a la energía potencial del agua, se puede obtener con la implantación de turbinas con diferentes mecanismos.

Turbinas de acción

Las turbinas de acción o impulso, son aquellas en las cuales la presión estática permanece constante entre la

entrada y la salida del rodete. Esto se consigue, mediante unos chorros de gran velocidad, que son proyectados contra las cazoletas o álabes de la turbina, que a la vez están fijadas en el rodete.

El agua después de impactar contra los álabes, pierden gran parte de energía y cae al canal de descarga.

Turbinas de reacción

Las turbinas de reacción, son aquellas en las cuales la presión estática disminuye entre la entrada y la salida del rodete, gracias a que están sumergidas completamente o parcialmente, de ese modo, la presión del agua actúa directamente sobre los álabes del rodete, disminuyendo de valor la presión a medida que avanza en su recorrido.

4.5.4 Criterios de selección

a. Altura del salto y la potencia de la turbina

Uno de los principales criterios de selección de la turbina es la potencia que esta puede suministrar. La misma, es directamente proporcional a dos magnitudes: a la altura neta y al caudal de agua turbinado.

Para saber el salto neto de una central, antes se deberán de conocer las pérdidas de carga, el salto bruto

y el salto útil. Estudio para el desarrollo de centrales micro hidráulicas.

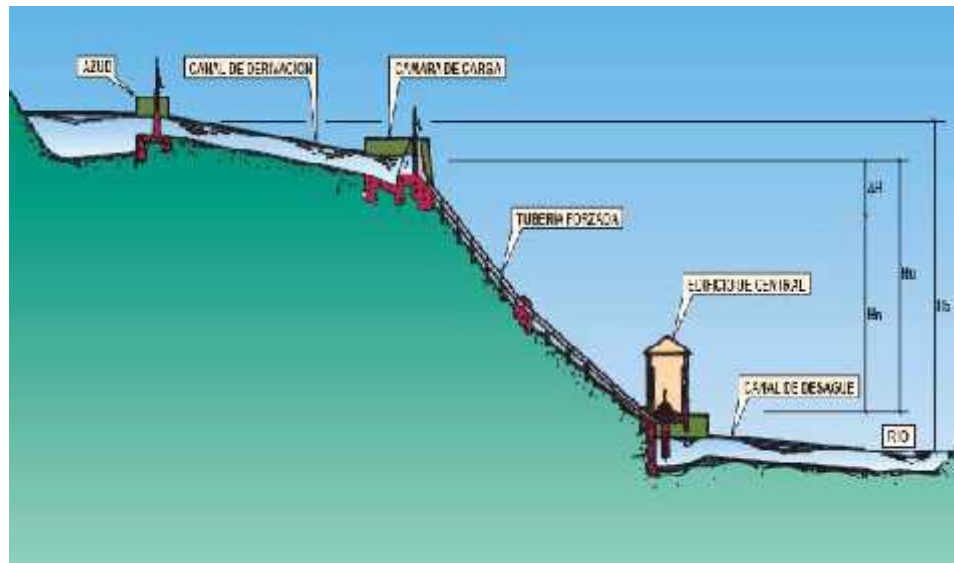


Figura 4.13. Esquema del salto de agua

Salto bruto (H_b): Distancia vertical, medida entre los niveles de la lámina de agua en la toma y en el canal de descarga.

Salto útil (H_u): Distancia vertical, medida entre los niveles de la lámina de agua en la cámara de carga y el nivel de desagüe de la turbina.

Salto neto (H_n): Conocido el salto útil, y restándole las pérdidas de carga (H) debidas del rozamiento del agua con las paredes de la turbina y a las turbulencias, obtenemos el salto neto.

Cada tipo de turbina tiene un rango de valores de salto neto en los cuales puede trabajar, produciéndose

solapamientos, que dan lugar a emplearse varios tipos de turbina para un mismo salto neto.

Este rango de valores se especifica en la siguiente tabla, para las tres clases de turbinas más comunes (valores aproximados):

Tabla 4.3. Rango de alturas de saltos

Tipo de turbina	Rango de salto (m)
Kaplan y hélice	$1 < H_n < 30$
Francis	$4 < H_n < 300$
Pelton	$20 < H_n < 1000$

Como se mencionó antes, la potencia es directamente proporcional a dos magnitudes: a la altura neta y al caudal de agua turbinada. Esto da a lugar a un diagrama de selección de la turbina, haciendo uso del salto, el caudal y a la potencia.

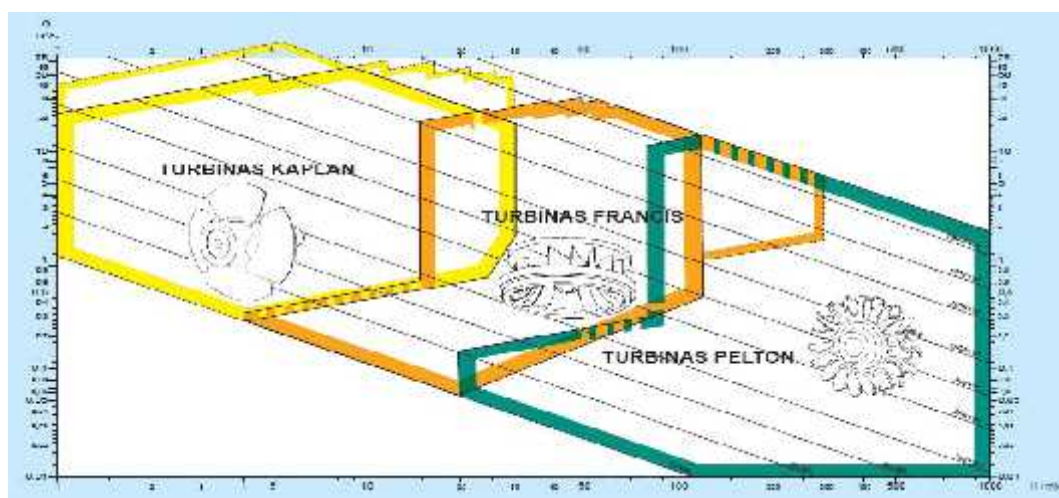


Figura 4.14. Diagrama de selección de turbinas hidráulicas caudal / altura

b. Velocidad de rotación

La velocidad de rotación es función de la velocidad específica, de la potencia y de la altura neta. En las micro centrales la elección de la turbina se debe realizar teniendo en cuenta que puede estar acoplada con el generador, directamente o a través de un multiplicador de velocidad para alcanzar la velocidad de sincronismo en los casos donde sea necesario.

Otro diagrama de elección de la turbina es aplicando la siguiente figura 4.15 que relaciona el salto y la velocidad específica. Estudio para el desarrollo de centrales micro hidráulicas.

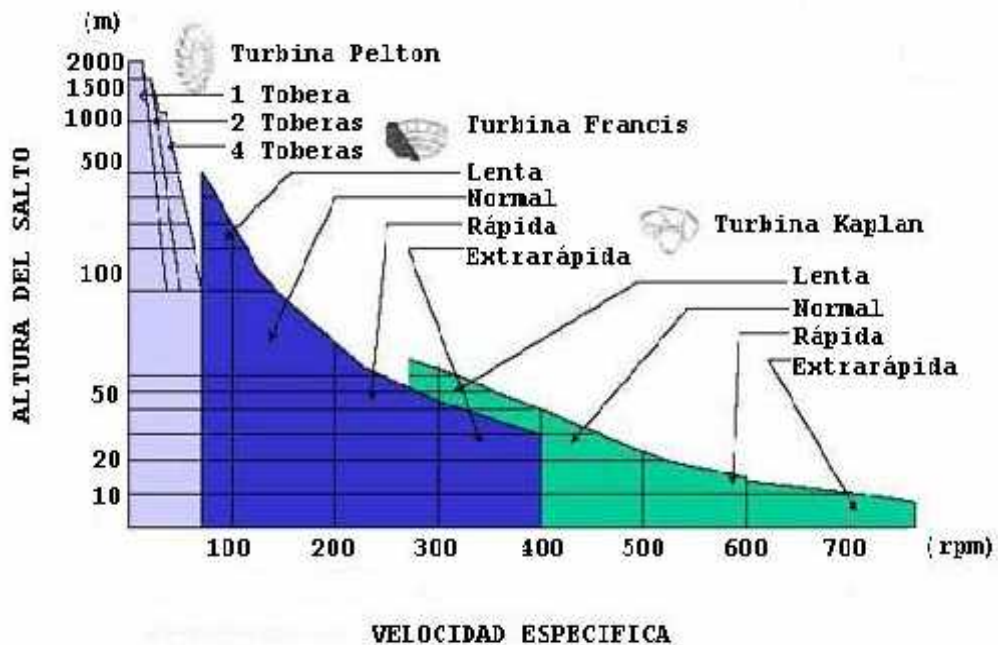


Figura 4.15. Diagrama de selección turbinas hidráulicas altura / velocidad específica

c. Velocidad de embalamiento

La velocidad de embalamiento es aquella que experimenta la turbina en el momento que por causas ajenas se queda sin carga. Esto provoca un aumento considerable de la velocidad de la misma pudiendo provocar desperfectos tanto en el generador como en el multiplicador. Por ello, en el momento de la elección del generador y/o el multiplicador se tendrá en cuenta que deberá soportar dicha velocidad.

En las turbinas Kaplan, la velocidad de embalamiento puede llegar a ser de 3.2 veces superior a la nominal. En la turbina Francis, Pelton y Banki, esa relación varía entre 1.8 y 2.

4.5.5 Transmisión de la potencia

La energía mecánica desarrollada por la turbina debe ser transmitida al generador, para este generar la energía eléctrica deseada. Para ello se precisa de una transmisión que unirá la turbina con el generador.

En ocasiones el sistema está diseñado para trabajar con la turbina y el generador a la misma velocidad, favoreciendo de ese modo el rendimiento del conjunto, ya que pueden ser

conectados directamente evitando las pérdidas mecánicas ocasionadas por las transmisiones.

En la mayoría de los casos, donde las turbinas son de baja potencia, la velocidad del rodete es considerablemente inferior a la velocidad de giro de un generador Standard. Por lo tanto, se debe instalar una transmisión para poder acoplar la turbina con el generador. Las transmisiones más frecuentes son las rígidas y las flexibles.

Las transmisiones rígidas se realizan a través de unas cajas de engranajes, estas proporcionan un elevado rendimiento ya que sus pérdidas por fricción son menores y además de ocupar poco espacio, se adapta a transmisiones tanto de alta como baja velocidad.

Por otro lado, es un sistema delicado y que exige un gran cuidado y mantenimiento adecuado además de que su coste es elevado a comparación con los sistemas flexibles.

Las transmisiones flexibles se realizan a través de correderas, siendo este tipo de transmisión el más utilizado en micro centrales. Estas dan la posibilidad de unión del árbol conductor con el conducido a distancias relativamente grandes, con un funcionamiento suave, sin golpes y silencioso, a la vez que actúa como fusible mecánico del sistema.

Tiene un diseño sencillo, un mantenimiento reducido y su coste es muy inferior al sistema de engranajes.

La transmisión por correderas presenta una serie de inconvenientes, en el uso en bajas velocidades, su uso está limitado a pequeñas potencias, en algunos casos no se podrá garantizar una relación constante de transmisión entre los movimientos entre conductor y conducido y su ciclo de vida es relativamente bajo.

4.5.6. Pico turbinas

I.T.D.G. (2000), explica que los sistemas de pico generación son una contribución al suministro de energía de hasta 10 Kw. Un hidrosistema requiere de una caudal de agua y una diferencia de altura para producir potencia útil. Se trata de un sistema de conversión de energía en la forma de caudal y salto y se entrega energía en forma de electricidad o energía mecánica al eje.



Fig. 4.16 Pico turbina pelton.

Picoturbinas Pelton

La aparición de picocentrales hidroeléctricas y consecuentemente de picoturbinas, tiene apenas una década. El rango de picocentrales está por debajo de los 10kW. Las picoturbinas se aprovechan por los recursos hidráulicos existentes en quebradas muy pequeñas, manantiales u otras fuentes donde existen algunos chorros de agua y alguna pequeña caída que podría transformarse en energía mecánica o eléctrica.

Las picoturbinas se diseñan en la actualidad como pequeños bloques compactos, donde en una sola unidad se incluyen todas sus partes.

Se caracteriza principalmente por su pequeño tamaño, su versatilidad y por su facilidad para el transporte e instalación.

CAPITULO V

DESARROLLO DEL TRABAJO EXPERIMENTAL

5.1. DIRECTRICES PARA EL DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Montgomery, D. (1997), nos indica que para usar un enfoque estadístico al diseñar y analizar un experimento se requiere que de antemano se tenga una idea clara de que es exactamente los que qué se va a estudiar, como se van a recopilar datos, unas ideas cualitativas de cómo se van a analizar.

) Comprensión y planteamiento del problema.

El tema de estudio está centrado en una pico turbina de eje vertical, que pretende ser instalada en un canal de irrigación, para diversas aplicaciones tales como la generación eléctrica o

también como un sistema de bombeo para su aplicación en riego tecnificado.

) Elección de factores y niveles

En el planteamiento metodológico la variable independiente es el diseño factorial, pero este diseño requiere su caracterización para poder aplicarse al estudio experimental de nuestra pico turbina.

En las micro turbinas el número de alabes juega un papel importante en el rendimiento, de igual modo el ángulo de los alabes, del mismo modo por la configuración de la pico turbina y por la configuración del diseño factorial que necesita que cada variable tenga dos niveles elegimos para la variable numero de alabes como su nivel alto 12 alabes y para su nivel bajo seis variables.

Para la variable ángulo de alabes elegimos como el nivel alto 105° y el nivel bajo 90° grados para la primera matriz experimental, para la segunda matriz experimental la primera variable queda entre 12 y 6 alabes y para la variable ángulo de alabes el nivel alto será 90° y el nivel bajo 75°

) Selección de la variable respuesta

Después de elegir las variables o factores y sus respectivos niveles elegimos la variable respuesta, que en este caso vendría ser la RPM, que por las características de la pico turbina es muy fácil de medir y sobre todo lo que me interesa es

lograr la mayor velocidad.

) Elección del diseño experimental

Elegimos el diseño factorial 2^2 , que es un diseño que analiza dos variables independientes con dos niveles tal como explicamos líneas arriba, y que analiza las diferentes posibilidades de interrelación en una variable respuesta.

Por las características de la pico turbina materia de estudio hemos diseñado un método de análisis con dos matrices de experimentación, para poder analizar de manera mucho más amplia la variación de los ángulos y sus consecuencias directas en la variable respuesta.

Establecemos como la Variable "A" al número de alabes y a la variable "B" al ángulo de inclinación de los alabes.

) Realización del experimento

Para la realización del experimento se eligió un canal de irrigación que se encuentra en el distrito de Orcotuna, Provincia de Concepción del Departamento de Junín.

El diseño factorial 2^2 organiza el desarrollo del experimento en cuatro tratamientos, de los cuales el primero establece las condiciones de trabajo con las dos variables en el nivel bajo, el segundo tratamiento A en el nivel alto y B en el nivel bajo, el tercer tratamiento A en el nivel bajo y B en el nivel alto y en cuarto tratamiento A y B en el nivel alto. Del mismo modo también consideramos que el experimento se realice con cinco

replicas.

) Validación de la Hipótesis

La hipótesis plantea que con aplicación del diseño factorial se puede optimizar el rendimiento de una pico turbina de eje vertical; para lo cual se plantea una hipótesis estadística.

$H_0 = \text{Hipótesis nula} = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$

$H_1 = \text{Hipótesis alterna} = \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4$

Que será validada con la aplicación del Teorema de Cochran y con las tablas de distribución de Fisher al 99%

5.2. PRIMER MODULO DE EXPERIMENTOS

Este primer modulo se realiza con cuatro tratamientos teniendo como particularidad que en dos de ellos el alabe está inclinado 105° con respecto a la abscisa en sentido horario.

Tabla 5.1. Tratamiento con 6 alabes y 90°

Réplicas	Revoluciones	Tiempo (min)
I	57.1	1
II	59.4	1
III	58.1	1
IV	59.5	1
V	59.1	1

Tabla 5.2. Tratamiento con 12 alabes y 90°

Réplicas	Revoluciones	Tiempo (min)
I	52.1	1
II	50.8	1
III	53.6	1
IV	50.9	1
V	50.6	1

Tabla 5.3. Tratamiento con 6 alabes y ángulo de inclinación 105°

Réplicas	Revoluciones	Tiempo (min)
I	51.1	1
II	50	1
III	52.1	1
IV	59.6	1
V	51.6	1

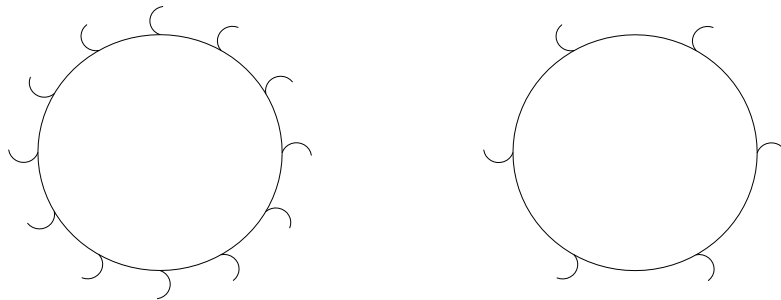
Tabla 5.4. Tratamiento con 12 y 105°

Réplicas	Revoluciones	Tiempo (min)
I	56.1	1
II	58.5	1
III	58.7	1
IV	56.9	1
V	57.1	1

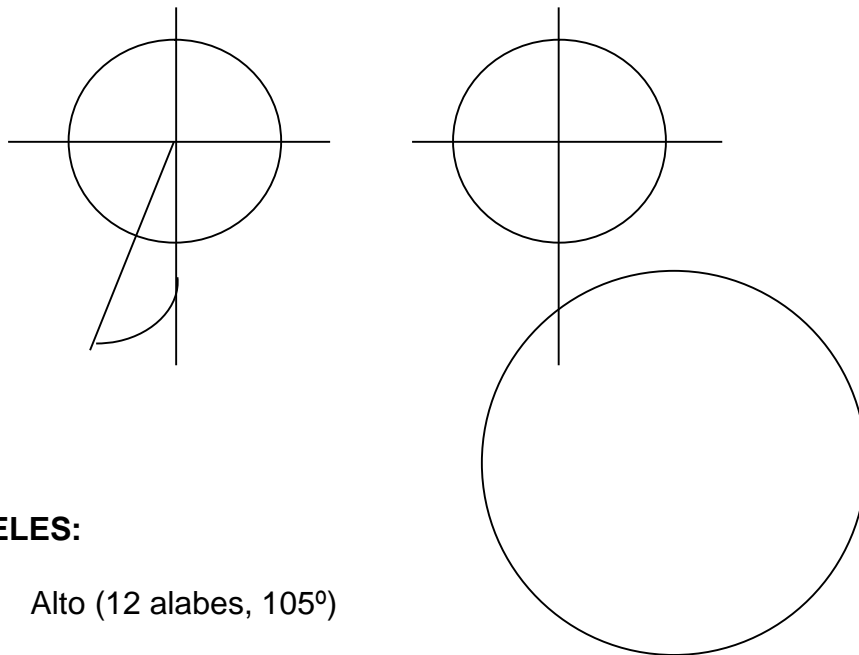
ANÁLISIS FACTORIAL DE LA EXPERIMENTACIÓN DE LA PICO TURBINA - DISEÑO FACTORIAL 2^2

VARIABLES

) (A) → Numero de alabes 6 y 12



) (B) → posición de los alabes 90° y 105° respecto a la abscisa



NIVELES:

- Alto (12 alabes, 105°)
- Bajo (6 alabes, 90°)

FACTORES:

- Número de Alabes (A)
- Ángulo de inclinación de los alabes. (B)

VARIABLE RESPUESTA:

- Velocidad de rotación de la pico turbina.

Tabla 5.5. Combinaciones de tratamientos para el diseño

Representación	Combinación de tratamientos	Réplicas					TOTAL
		I	II	III	IV	V	
(1)	A baja, B baja	57.1	59.4	58.1	59.5	59.1	293.20
a	A alta, B baja	52.1	50.8	53.6	50.9	50.6	258
b	A baja, B alta	51.1	50	52.1	59.6	51.6	264.4
ab	A alta, B alta	56.1	58.5	58.7	56.9	57.1	287.3

EFFECTOS:

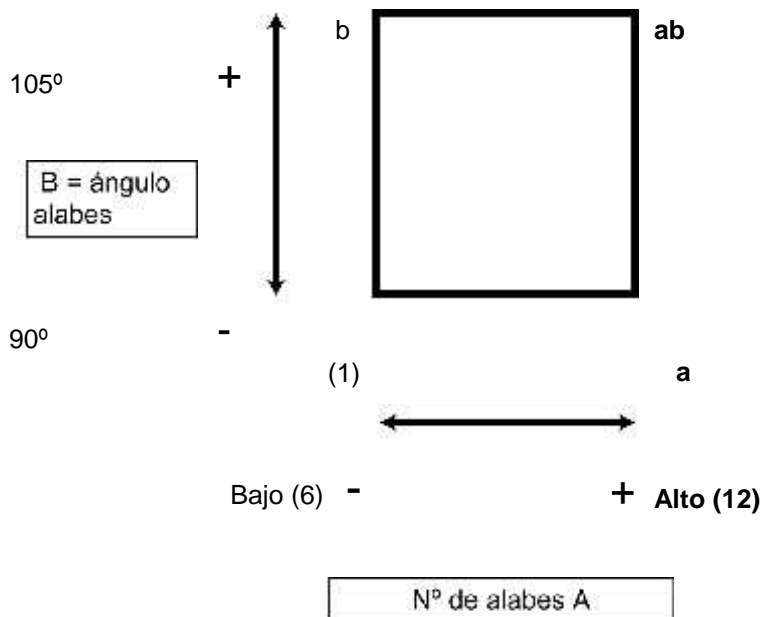


Figura 5.1. Combinaciones de tratamientos en los diseños 2²

Efecto de A en el nivel inferior y superior de B: (promedio)

$$A \times \frac{1}{2n} \sum_{a,b} f_{ab} \Gamma_a Z_b Z_{fj} \mathbb{A}$$

$$A \times Z_{1,23}$$

Efecto de B sobre el nivel inferior y superior de A (promedio)

$$B \times \frac{1}{2n} \sum_{a,b} f_{ab} \Gamma_b Z_a Z_{fj} \mathbb{A}$$

$$B \times 0,05$$

Efecto de interacción AB o promedio entre efecto A en B inferior y efecto en B superior:

$$AB \times \frac{1}{2fn_A} \sum_{a,b} f_{ab} \Gamma_{fj} \mathbb{A} Z_a Z_b \mathbb{A}$$

$$AB \times 5,81$$

Contrastes respectivos: Se calculan a partir de los efectos:

$$\text{Contraste A} = ab + a - b - (1) = -12,3$$

$$\text{Contraste B} = ab + b - a - (1) = 5,0$$

$$\text{Contraste AB} = ab + (1) - a - b = 58,1$$

SUMAS DE CUADRADOS: Los cuales se hallan a partir de los contrastes al cuadrado divididos entre el producto de número de réplicas y número de tratamientos.

SUMA DE CUADRADO DE A:

$$SS_A \times \frac{f_{\text{contraste A}} \mathbb{A}}{4n}$$

$$SS_A = 7,5645$$

SUMA DE CUADRADO DE B:

$$SS_B = \sum \frac{f_{\text{contraste B}}^2}{4n}$$

$$SS_B = 0,01$$

SUMA DE CUADRADO DE AB:

$$SS_{AB} = \sum \frac{f_{\text{contraste A}}^2}{4n}$$

$$SS_{AB} = 168,7805$$

Inmediatamente calculamos:

SUMA DE CUADRADOS TOTALES mediante:

$$SS_T = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} y_{ijk}^2 = \sum \frac{y_{\dots}^2}{4n}$$

Reemplazamos los datos respectivos:

$$SS_T = 250,7095$$

Además suma de cuadrados del ERROR:

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB}$$

$$SS_E = 74,35$$

Los valores hallados los analizamos en el cuadro de varianza:

Tabla 5.6. Análisis de la varianza

	SUMA DE CUADRADOS	GRADO LIBERTAD	MEDIA CUADRADA	F₀
A	7,5645	1	7,5645	1,6278244
B	0,01	1	0,0125	0,00226899
AB	168,7805	1	168,7805	36,3203142
ERROR	74,35	16	4,647	-----
TOTAL	250,7095	19	-----	

Teorema de Cochran

$$F_0 > F_{\alpha; a; Z1; N; Za} : F_{1; 3; 16}$$

- 1,6278244 > 9,01 La hipótesis alterna es falsa
- 0,00226899 > 9,01 La hipótesis alterna es falsa
- 36,3203142 > 9,01 La hipótesis alterna es verdadera

Análisis de Residuos

Modelo de regresión será:

$$y = X_0 \Gamma_0 + X_1 \Gamma_1 + X_2 \Gamma_2 + \dots + X_m \Gamma_m$$

Relación variables natural (Número de Alabes – Angulo de inclinación) y variables codificadas (x₁ ; x₂) es:

$$X_1 X \frac{\#alabes Z \#alabes_{alto} \Gamma \#alabe_{bajo} \Lambda^2}{\#alabe_{alto} Z \#alabe_{bajo} \Lambda^2}$$

$$X_1 X \frac{ALAB Z \frac{f \Gamma 6 A}{2}}{12 Z 6}$$

$$X_1 X \frac{ALAB Z 9}{3}$$

$$X_2 X \frac{Z f_{alto} \Gamma_{bajo} \Lambda^2}{f_{alto} Z_{bajo} \Lambda^2} X \frac{ANG Z \frac{105 \Gamma 90}{2}}{105 Z 90} \quad \boxed{x_2 X \frac{ANG Z 97,5}{7,5}}$$

MODELO DE REGRESIÓN AJUSTADO:

$$\hat{y} X \bar{y} \Gamma \frac{A}{2} x_1 \Gamma \frac{B}{2} x_2; A y B \text{ fueron hallados antes}$$

La gran media $\bar{y} = 55,145$

La conexión de signos nos indica que en el nivel alto de las variables se le asigna + 1 y en el nivel bajo -1.

Tabla 5.7. Residuos del primer tratamiento

Y,	55.74
(-) (-)	
e1	1.37
e2	3.67
e3	2.37
e4	3.77
e5	3.37

Tabla 5.8. Residuos del segundo tratamiento

Y _{,,}	54.51
(+) (-)	
e6	-2.40
e7	-3.71
e8	-0.90
e9	-3.61
e10	-3.90

Tabla 5.9. Residuos del tercer tratamiento

Y _{,,,}	55.79
(-) (+)	
e11	-4.69
e12	-5.79
e13	-3.69
e14	3.81
e15	-4.19

Tabla 5.10. Residuos del cuarto tratamiento

Y _{,,,,}	54.56
(+) (+)	
e16	1.54
e17	3.94
e18	4.15
e19	2.34
e20	2.54

5.3. SEGUNDO MODULO DE EXPERIMENTOS

Este segundo modulo se realiza con cuatro tratamientos teniendo como particularidad que en dos de ellos el alabe está inclinado 75° con respecto a la abscisa en sentido horario.

Tabla 5.11. Tratamiento con 6 alabes y 75°

Réplicas	Revoluciones	Tiempo (min)
I	55	1
II	54	1
III	53,5	1
IV	54,5	1
V	54	1

Tabla 5.12. Tratamiento con 12 alabes y 75°

Réplicas	Revoluciones	Tiempo (min)
I	50,2	1
II	49	1
III	49,4	1
IV	49,8	1
V	50	1

Tabla 5.13. Tratamiento con 6 alabes y ángulo de inclinación 90°

Réplicas	Revoluciones	Tiempo (min)
I	62	1
II	62,4	1
III	61,8	1
IV	61,5	1
V	62,2	1

Tabla 5.14. Tratamiento con 12 y 90°

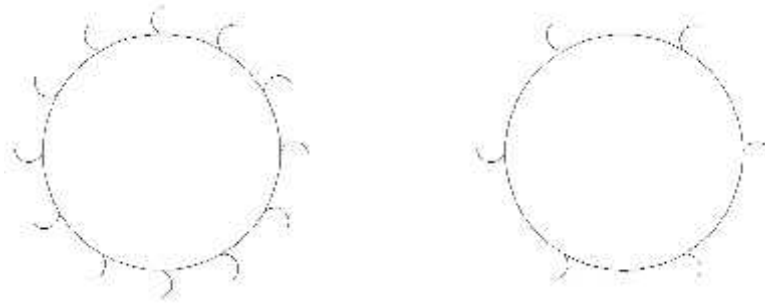
Réplicas	Revoluciones	Tiempo (min)
I	58	1
II	58.5	1
III	58.2	1
IV	59	1
V	58,6	1

ANÁLISIS FACTORIAL DE LA EXPERIMENTACIÓN DE LA PICO

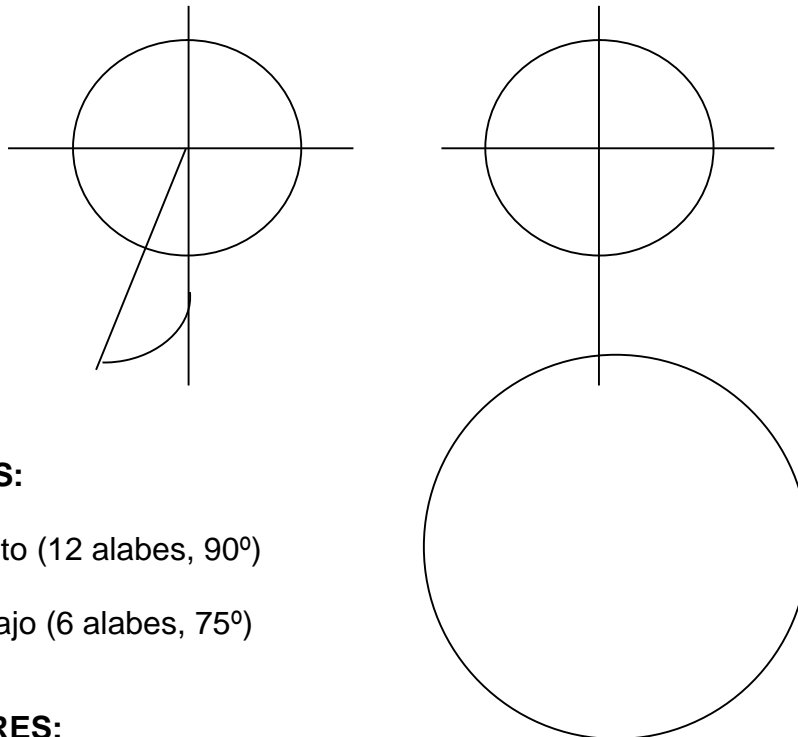
TURBINA - DISEÑO FACTORIAL 2^2

VARIABLES

) (A) → Numero de alabes 6 y 12



) (B) → posición de los alabes 90° y 75° respecto a la tangente



NIVELES:

- Alto (12 alabes, 90°)
- Bajo (6 alabes, 75°)

FACTORES:

- Número de Alabes (a)
- Ángulo de inclinación de los alabes. (b)

VARIABLE RESPUESTA:

- Velocidad de rotación de la pico turbina.

Tabla 5.15. Combinaciones de tratamientos para el diseño

Representación	Combinación de tratamientos	Réplicas					TOTAL
		I	II	III	IV	V	
(1)	A baja, B baja	55	54	53,5	54,5	54	271,00
a	A alta, B baja	50,2	49	49,4	49,8	50	248,4
b	A baja, B alta	62	62,4	61,8	61,5	62,2	309,9
ab	A alta, B alta	58	58,5	58,2	59	58,6	292,3

EFFECTOS:

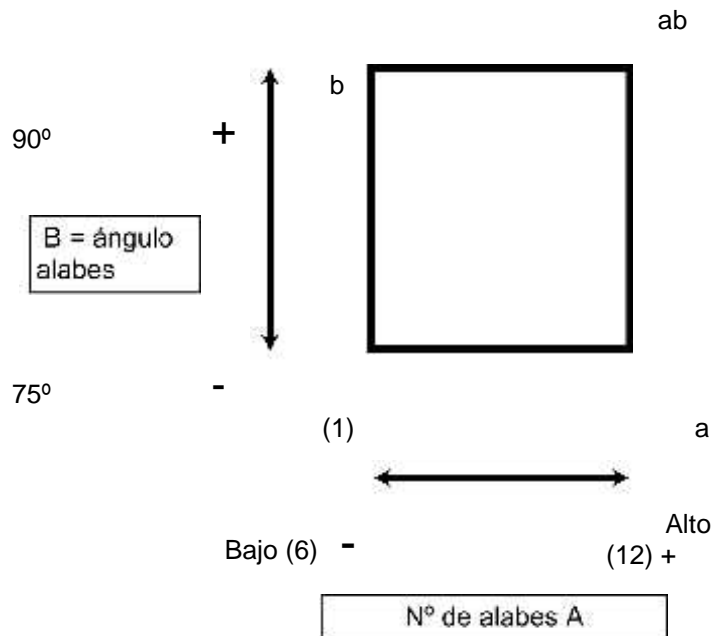


Figura 5.2. Combinaciones de tratamientos en los diseños 2²

Efecto de A en el nivel inferior y superior de B: (promedio)

$$A \times \frac{1}{2n} \sum_{a,b} f_{ab} \Gamma_a Z_b Z_{fj} \mathbb{A}$$

$$A \times 24,02$$

Efecto de B sobre el nivel inferior y superior de A (promedio)

$$B \times \frac{1}{2n} \sum_{a,b} f_{ab} \Gamma_b Z_a Z_{fj} \mathbb{A}$$

$$B \times 8,28$$

Efecto de interacción AB o promedio entre efecto A en B inferior y efecto en B superior:

$$AB \times \frac{1}{2fn} \sum_{a,b} f_{ab} \Gamma_{fj} \mathbb{A} Z_a Z_b \mathbb{A}$$

$$AB \times 0,5$$

Contrastes respectivos: Se calculan a partir de los efectos:

$$\text{Contraste A} = ab + a - b - (1) = -40,2$$

$$\text{Contraste B} = ab + b - a - (1) = 82,8$$

$$\text{Contraste AB} = ab + (1) - a - b = 5,0$$

SUMAS DE CUADRADOS: Los cuales se hallan a partir de los contrastes al cuadrado divididos entre el producto de número de réplicas y número de tratamientos.

SUMA DE CUADRADO DE A:

$$SS_A \times \frac{f_{\text{contraste A}}^2}{4n}$$

$$SS_A = 80,802$$

SUMA DE CUADRADO DE B:

$$SS_B = \sum \frac{f_{\text{contraste B}}^2}{4n}$$

$$SS_B = 342,79$$

SUMA DE CUADRADO DE AB:

$$SS_{AB} = \sum \frac{f_{\text{contraste A}}^2}{4n}$$

$$SS_{AB} = 1,25$$

Inmediatamente calculamos:

SUMA DE CUADRADOS TOTALES mediante:

$$SS_T = \sum_{i \in I} y_{i \cdot}^2 + \sum_{j \in J} y_{\cdot j}^2 + \sum_{k \in K} y_{\cdot k}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{4n}$$

Reemplazamos los datos respectivos:

$$SS_T = 428,152$$

Además suma de cuadrados del ERROR:

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB}$$

$$SS_E = 3,31$$

Los valores hallados los analizamos en el cuadro de varianza:

Tabla 5.16. Análisis de la varianza

	SUMA DE CUADRADOS	GRADO LIBERTAD	MEDIA CUADRADO	F₀
A	80,802	1	80,802	390,8198
B	342,79	1	342,792	1658,00242
AB	1,25	1	1,25	6,04594921
ERROR	3,31	16	0,20675	-----
TOTAL	428,152	19	-----	

Teorema de Cochran

$$F_0 > F_r, a Z1; N Z a : F_r 0.01;3;16$$

- 390,8198 < 9,01 La hipótesis alterna es falsa
- 1658,00242 < 9,01 La hipótesis alterna es falsa
- 6,04594921 > 9,01 La hipótesis alterna es verdadera

Análisis de residuos

Modelo de regresión será:

$$y = X_0 \Gamma_0 + X_1 \Gamma_1 + X_2 \Gamma_2 + \dots + X_m \Gamma_m$$

Relación variables natural (Número de Alabes – Angulo de inclinación) y variables codificadas (x₁ ; x₂) es:

$$X_1 X \frac{\#alabes Z \#alabes_{alto} \Gamma \#alabe_{bajo} \Lambda 2}{\#alabe_{alto} Z \#alabe_{bajo} \Lambda 2}$$

$$X_1 X \frac{ALAB Z \frac{f 12 \Gamma 6 A}{2}}{12 Z 6}$$

$$X_1 X \frac{ALAB Z 9}{3}$$

$$X_2 X \frac{Z f_{alto} \Gamma_{bajo} \Lambda 2}{f_{alto} Z \Gamma \Lambda 2} X \frac{ANG Z \frac{90 \Gamma 75}{2}}{90 Z 75}$$

$x_2 X \frac{ANG Z 82,5}{7,5}$

MODELO DE REGRESIÓN AJUSTADO:

$$\hat{y} X \bar{y} \Gamma \frac{A}{2} x_1 \Gamma \frac{B}{2} x_2; A y B \text{ fueron hallados antes}$$

La gran media $\bar{y} = 56,08$

La conexión de signos nos indica que en el nivel alto de las variables se le asigna + 1 y en el nivel bajo -1.

Tabla 5.17. Residuos del primer tratamiento

Y,	53,95
(-) (-)	
e1	1,05
e2	0,05
e3	-0,45
e4	0,55
e5	0,05

Tabla 5.18. Residuos del segundo tratamiento

Y _{,,}	49,93
(+) (-)	
e6	0,27
e7	-0,93
e8	-0,53
e9	-0,13
e10	0,07

Tabla 5.19. Residuos del tercer tratamiento

Y _{,,,}	62,23
(-) (+)	
e11	-0,23
e12	0,17
e13	-0,43
e14	-0,73
e15	-0,03

Tabla 5.20. Residuos del cuarto tratamiento

Y _{,,,,}	58,21
(+) (+)	
e16	-0,21
e17	0,29
e18	-0,01
e19	0,79
e20	0,39

) Análisis de datos

En el capítulo VI analizaremos todos los resultados.

CAPITULO VI

ANALISIS DE DATOS

6.1. PRIMER MODULO

Tabla 6.1. Combinaciones de tratamientos para el diseño

Representación	Combinación de tratamientos	Réplicas RPM					TOTAL
		I	II	III	IV	V	
(1)	A baja, B baja	57.1	59.4	58.1	59.5	59.1	293.20
a	A alta, B baja	52.1	50.8	53.6	50.9	50.6	258
b	A baja, B alta	51.1	50	52.1	59.6	51.6	264.4
ab	A alta, B alta	56.1	58.5	58.7	56.9	57.1	287.3

EFFECTOS:

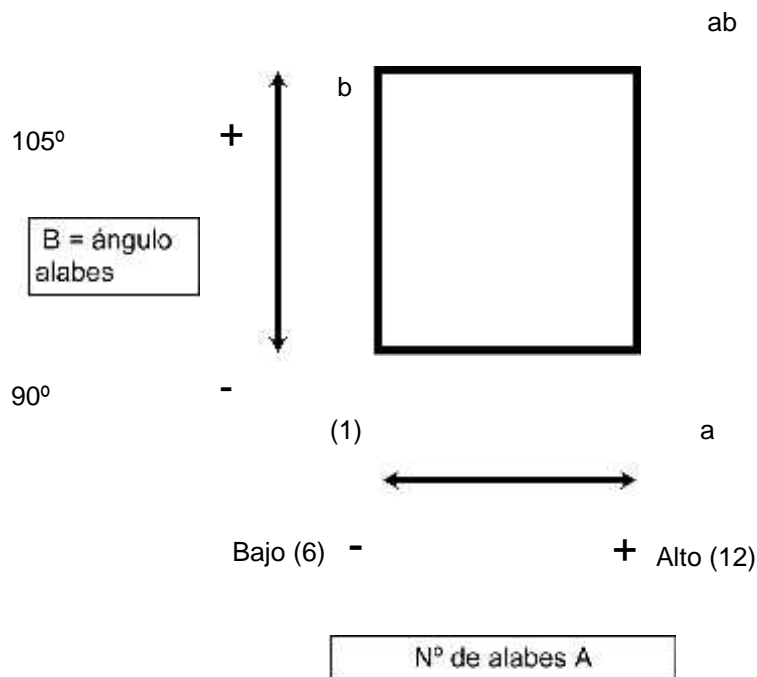


Figura 6.1. Combinaciones de tratamientos en los diseños 2²

Efecto de A en el nivel inferior y superior de B: (promedio)

$$A = \frac{1}{2n}(ab + a - b - (1))$$

$$A = -1,23$$

Efecto de B sobre el nivel inferior y superior de A (promedio)

$$B = \frac{1}{2n}(ab + b - a - (1))$$

$$B = 0,05$$

Efecto de interacción AB o promedio entre efecto A en B inferior y efecto en B superior:

$$AB = \frac{1}{2(n)}(ab + (1) - a - b)$$

$$AB = 5,81$$

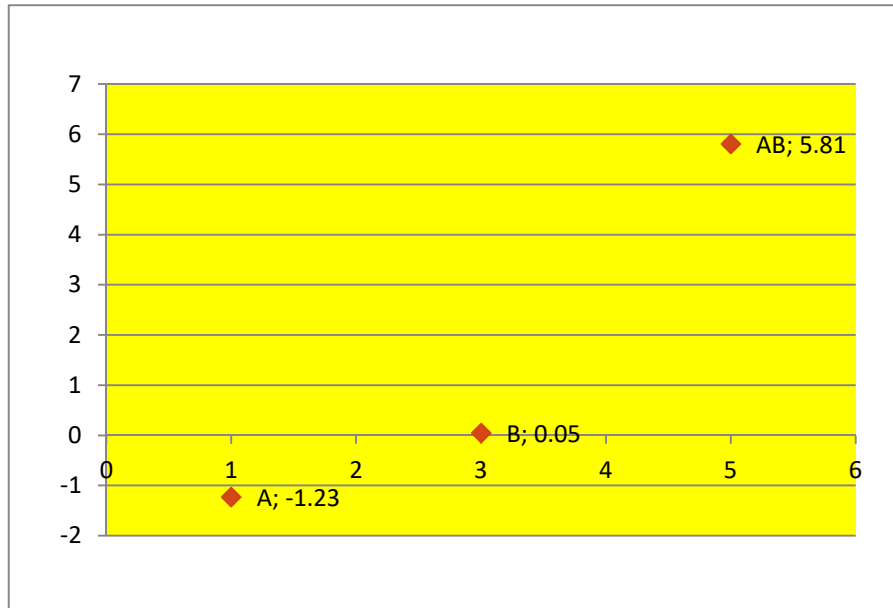


Figura 6.2. Resultados del análisis factorial

- El grafico nos indica que la pico turbina tiene su más alto rendimiento cuando la variable A esta en el nivel bajo y la variable B en el nivel alto, por lo que podríamos decir que el tercer tratamiento es donde el sistema tiene mayor rendimiento; pero vemos con preocupación que la Interacción de las variables AB tiene un valor muy alto en comparación con las variables lo que nos inclina a pensar que pueden haber serias perturbaciones en el

funcionamiento de la turbina. Para corroborar estos resultados se ejecuta el análisis de la varianza.

Los valores hallados los analizamos en el cuadro de varianza:

Tabla 6.2. Análisis de la varianza

	SUMA DE CUADRADOS	GRADO LIBERTAD	MEDIA CUADRADA	F₀
A	7,5645	1	7,5645	1,6278244
B	0,01	1	0,0125	0,00226899
AB	168,7805	1	168,7805	36,3203142
ERROR	74,35	16	4,647	-----
TOTAL	250,7095	19	-----	

- En el análisis de varianza podemos ver que la posición de A se invierte con respecto a B, manteniéndose la interrelación AB en un valor muy alto, por lo que podemos deducir que no hay corroboración de resultados.

Teorema de Cochran

$$F_0 > F_r, a - 1; N - a : F_r 0.01; 3; 16$$

1,6278244 > 9,01 La hipótesis alterna es falsa

0,00226899 > 9,01 La hipótesis alterna es falsa

36,3203142 > 9,01

La hipótesis alterna es verdadera

- Del teorema de Cochran F_0 para la variable A la hipótesis alterna es falsa lo mismo que B, y para la interrelación de variables AB es verdadera por lo que deducimos que el modelo experimental planteado tiene serias perturbaciones. Al ser falsa la hipótesis alterna en A y B se entiende que no hay mejora en la inclinación de los alabes a 105° con respecto a la abscisa.

Análisis de residuos

Modelo de regresión será:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + m$$

Relación variables natural (Número de Alabes – Angulo de inclinación) y variables codificadas (x_1 ; x_2) es:

$$X_1 = \frac{\#alabes - (\#alabes_{alto} + \#alabe_{bajo})/2}{(\#alabe_{alto} - \#alabe_{bajo})/2}$$

$$X_1 = \frac{ALAB - \frac{(12+6)}{2}}{\frac{12-6}{2}}$$

$$X_1 = \frac{ALAB - 9}{3}$$

$$X_2 = \frac{\angle - (\angle_{alto} + \angle_{bajo})/2}{(\angle_{alto} - r)/2} = \frac{ANG - \left(\frac{105 + 90}{2}\right)}{\left(\frac{105 - 90}{2}\right)}$$

$$x_2 = \frac{ANG - 97,5}{7,5}$$

MODELO DE REGRESIÓN AJUSTADO:

$$\hat{y} = \bar{y} + \left(\frac{A}{2}\right)x_1 + \left(\frac{B}{2}\right)x_2; \text{ A y B fueron hallados antes}$$

La gran media $\bar{y} = 55,145$

La conexión de signos nos indica que en el nivel alto de las variables se le asigna + 1 y en el nivel bajo -1.

Tabla 6.3. Residuos del primer tratamiento

Y,	55.74
(-) (-)	
e1	1.37
e2	3.67
e3	2.37
e4	3.77
e5	3.37

Tabla 6.4. Residuos del segundo tratamiento

Y _{,,}	54.51
(+) (-)	
e6	-2.40
e7	-3.71
e8	-0.90
e9	-3.61
e10	-3.90

Tabla 6.5. Residuos del tercer tratamiento

Y _{,,,}	55.79
(-) (+)	
e11	-4.69
e12	-5.79
e13	-3.69
e14	3.81
e15	-4.19

Tabla 6.6. Residuos del cuarto tratamiento

Y _{,,,,}	54.56
(+) (+)	
e16	1.54
e17	3.94
e18	4.15
e19	2.34
e20	2.54

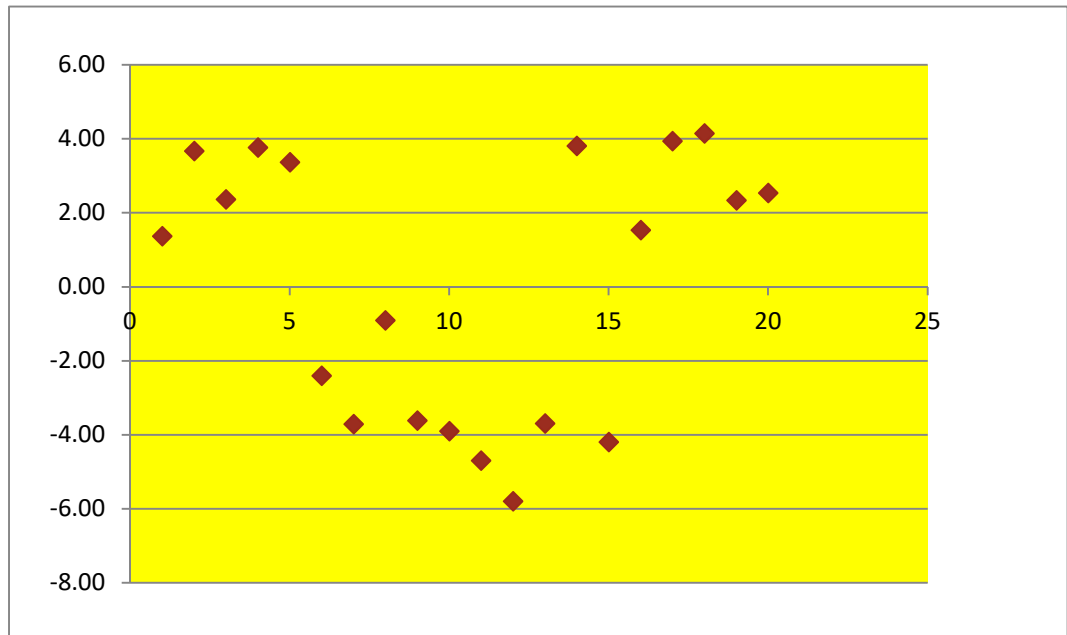


Figura 6.3. Residuos del modelo experimental

- Para que un diseño experimental tenga resultados satisfactorios tienen que estar el 100% de los residuos entre +3 y -3, 95% entre +2 y -2, y el 68% entre +1 y -1.
- Podemos ver en la grafica de residuos que 13 residuos exceden la condición de +3 y -3 por lo deducimos que se han presentado serias perturbaciones el trabajo experimental que podrían deberse a un diseño experimental con deficiencias, de igual modo a las condiciones de los datos tomados. Otro de los aspectos que podría tenerse en cuenta es las características de la pico turbina por la forma de los alabes, que esta posición disminuye su rendimiento.

6.2. SEGUNDO MODULO DE EXPERIMENTOS

Este segundo modulo se realiza con cuatro tratamientos teniendo como particularidad que en dos de ellos el alabe está inclinado 75° con respecto a la abscisa en sentido horario.

Tabla 6.7. Combinaciones de tratamientos para el diseño

Representación	Combinación de tratamientos	Réplicas (RPM)					TOTAL
		I	II	III	IV	V	
(1)	A baja, B baja	55	54	53,5	54,5	54	271,00
a	A alta, B baja	50,2	49	49,4	49,8	50	248,4
b	A baja, B alta	62	62,4	61,8	61,5	62,2	309,9
ab	A alta, B alta	58	58,5	58,2	59	58,6	292,3

EFFECTOS:

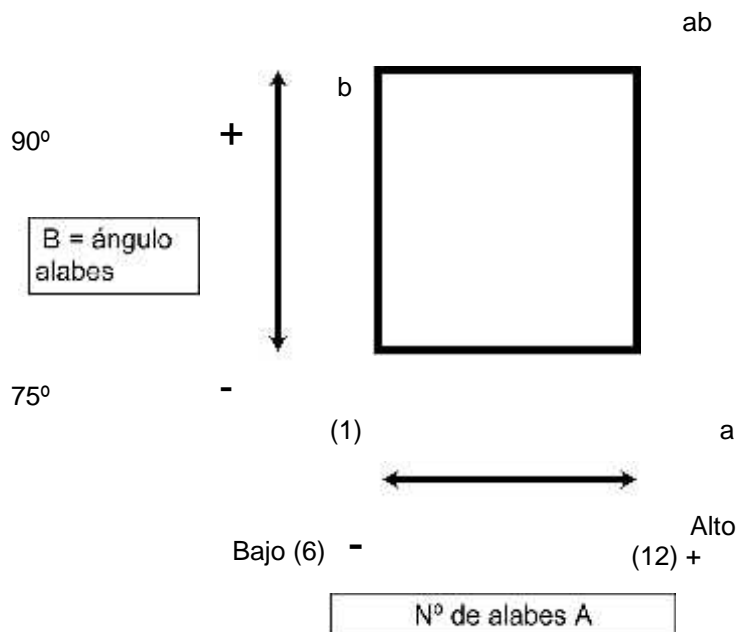


Figura 6.4. Combinaciones de tratamientos en los diseños 2^2

Efecto de A en el nivel inferior y superior de B: (promedio)

$$A = \frac{1}{2n}(ab + a - b - (1))$$

$$A = -4,02$$

Efecto de B sobre el nivel inferior y superior de A (promedio)

$$B = \frac{1}{2n}(ab + b - a - (1))$$

$$B = 8,28$$

Efecto de interacción AB o promedio entre efecto A en B inferior y efecto en B superior:

$$AB = \frac{1}{2(n)}(ab + (1) - a - b)$$

$$AB = 0,5$$

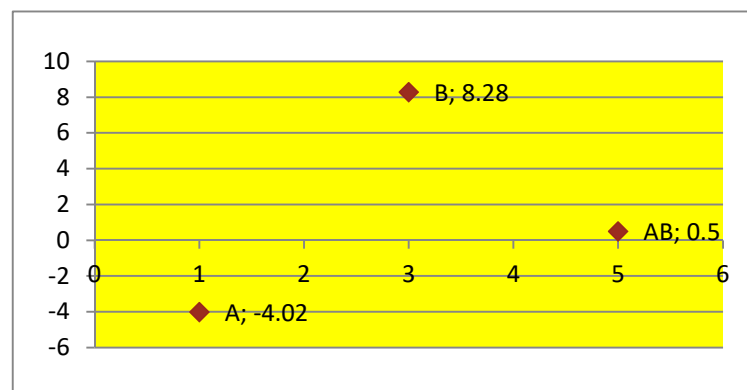


Figura 6.5. Resultados del análisis factorial

- El gráfico nos indica que la pico turbina tiene su más alto rendimiento cuando la variable A está en el nivel bajo y la variable B en el nivel alto, por lo que podríamos decir que el tercer

tratamiento es donde el sistema tiene mayor rendimiento; la interacción de las variables AB tiene un valor bajo en comparación con las variables lo que nos inclina a pensar que no hay perturbaciones en el funcionamiento de la turbina. Para corroborar estos resultados se ejecuta el análisis de la varianza.

Los valores hallados los analizamos en el cuadro de varianza:

Tabla 6.8. Análisis de la varianza

	SUMA DE CUADRADOS	GRADO LIBERTAD	MEDIA CUADRADO	F₀
A	80,802	1	80,802	390,8198
B	342,79	1	342,792	1658,00242
AB	1,25	1	1,25	6,04594921
ERROR	3,31	16	0,20675	-----
TOTAL	428,152	19	-----	

- En el análisis de varianza podemos ver que la posición de A y B, se mantienen corroborándose los resultados del análisis factorial lo mismo que en el caso de la interrelación AB, por lo que podemos deducir que hay corroboración de resultados con el análisis de la varianza.

Teorema de Cochran

$$F_0 > F_{\alpha, a-1; N-a} : F_{\alpha} 1;3;16$$

390,8198 > 9,01 La hipótesis alterna es verdadera

1658,00242 > 9,01 La hipótesis alterna es verdadera

6,04594921 > 9,01 La hipótesis alterna es falsa

- Del teorema de Cochran F_0 para la variable A la hipótesis alterna es verdadera lo mismo que B, y para la interrelación de variables AB es falsa por lo que deducimos que el modelo experimental planteado tiene resultados satisfactorios no presentándose las perturbaciones del modelo anterior. Al ser verdadera la hipótesis alterna en A y B se entiende que hay mejora en el rendimiento de la turbina con respecto a la inclinación de los alabes a 75° con respecto a la abscisa.

Análisis de residuos

Modelo de regresión será:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + m$$

Relación variables natural (Número de Alabes – Angulo de inclinación) y variables codificadas (x_1 ; x_2) es:

$$X_1 = \frac{\#alabes - (\#alabes_{alto} + \#alabe_{bajo})/2}{(\#alabe_{alto} - \#alabe_{bajo})/2}$$

$$X_1 = \frac{ALAB - \frac{(12+6)}{2}}{\frac{12-6}{2}}$$

$$X_1 = \frac{ALAB - 9}{3}$$

$$X_2 = \frac{\angle - (\angle_{alto} + \angle_{bajo})/2}{(\angle_{alto} - r)/2} = \frac{ANG - \left(\frac{90+75}{2}\right)}{\left(\frac{90-75}{2}\right)} \Rightarrow x_2 = \frac{ANG - 82,5}{7,5}$$

MODELO DE REGRESIÓN AJUSTADO:

$$\hat{y} = \bar{y} + \left(\frac{A}{2}\right)x_1 + \left(\frac{B}{2}\right)x_2; \text{ A y B fueron hallados antes}$$

La gran media $\bar{y} = 56,08$

La conexión de signos nos indica que en el nivel alto de las variables se le asigna + 1 y en el nivel bajo -1.

Tabla 6.9. Residuos del primer tratamiento

Y,	53,95
(-) (-)	
e1	1,05
e2	0,05
e3	-0,45
e4	0,55
e5	0,05

Tabla 6.10. Residuos del segundo tratamiento

Y _{,,}	49,93
(+) (-)	
e6	0,27
e7	-0,93
e8	-0,53
e9	-0,13
e10	0,07

Tabla 6.11. Residuos del tercer tratamiento

Y _{,,,}	62,23
(-) (+)	
e11	-0,23
e12	0,17
e13	-0,43
e14	-0,73
e15	-0,03

Tabla 6.12. Residuos del cuarto tratamiento

Y _{,,,,}	58,21
(+) (+)	
e16	-0,21
e17	0,29
e18	-0,01
e19	0,79
e20	0,39

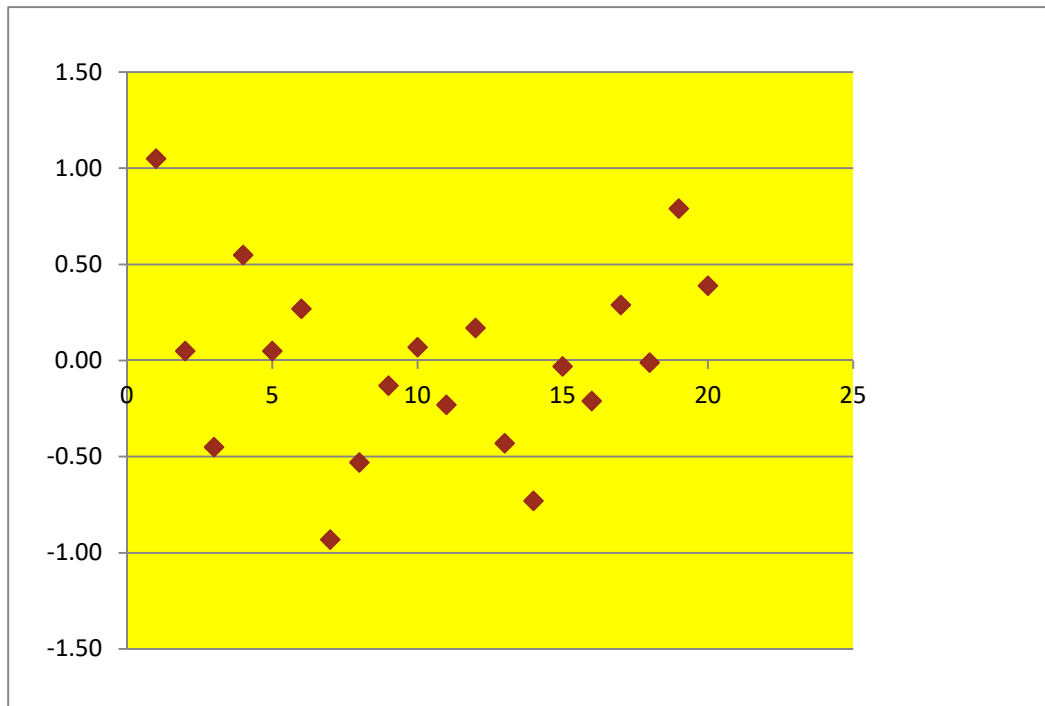


Figura 6.6. Residuos del diseño experimental

- Para que un diseño experimental tenga resultados satisfactorios tienen que estar el 100% de los residuos entre +3 y -3, 95% entre +2 y -2, y el 68% entre +1 y -1.
- Podemos ver en la grafica de residuos que todos residuos están entre +1 y -1 por lo deducimos que el diseño experimental es muy satisfactorio. Otro de los aspectos que podría tenerse en cuenta es las características de la pico turbina por la forma de los alabes, que estas posiciones mejora el rendimiento.